DAVID JULIO DA COSTA

**PIEZOCOMPÓSITOS COM GRADAÇÃO DE DENSIDADE PARA
APLICAÇÃO EM TRANSDUTORES DE ULTRASSOM PARA
ACOPLAMENTO EM AR**

São Paulo

2018

DAVID JULIO DA COSTA

**PIEZOCOMPÓSITOS COM GRADAÇÃO DE DENSIDADE PARA
APLICAÇÃO EM TRANSDUTORES DE ULTRASSOM PARA
ACOPLAMENTO EM AR**

Tese de doutorado apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do Título de Doutor em
Ciência.

Área de concentração:
Engenharia de Controle e Automação
Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Flávio Buiochi

**São Paulo
2018**

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

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo na Publicação

COSTA, David Julio da Costa

Piezocompósitos com gradação de densidade para aplicação em transdutores de ultrassom para acoplamento em ar / D. J. C. COSTA -- São Paulo, 2018.

160 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Transdutores (Aplicações) 2.Ultrassom 3.Piezocompósito 4.Ensaio não destrutivo 5.Emissão em ar I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Dedicatória

Aos meus pais.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Flávio Buiochi por ter acreditado em mim e aceito me orientar como aluno de doutorado para defesa desta tese. Muito obrigado pela paciência, orientação, compreensão e esclarecimentos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Grupo de Pesquisa do CAEND - Instituto de Acústica de Madrid - pela cooperação no decorrer do trabalho desenvolvido durante o estágio sanduíche; em especial aos pesquisadores Francisco Montero de Espinosa e Luis Elvira Segura.

Ao Prof. Dr. Julio Adamowski pela sabedoria e experiência nas sugestões sobre este trabalho. Aos pesquisadores Marco Aurélio, Nicolas e Timóteo pelas sugestões e discussões importantes.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio que recebi com a bolsa de doutorado.

Aos professores, amigos, familiares e a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse elaborado.

RESUMO

Para que um transdutor ultrassônico gere e transmita um pulso curto e receba ecos com elevada sensibilidade, além de uma camada de retaguarda que absorva as ondas emitidas para trás, é necessário que haja um bom casamento de impedância acústica entre a cerâmica piezelétrica e o meio externo (camada de acoplamento). Quando comparado ao acoplamento em líquido, o acoplamento em ar é ainda mais complexo, pois este tipo resulta em perdas elevadas durante a transmissão e a recepção dos sinais acústicos, devido à grande diferença de impedância acústica entre a cerâmica e o ar. Certas aplicações requerem um acoplamento em ar e, para isso, os transdutores ultrassônicos usados devem ter banda larga, além de uma baixa impedância acústica. O aumento da largura de banda de um transdutor piezelétrico pode ser alcançado com o emprego de piezocompósitos, de uma camada de retaguarda, de camadas de acoplamento frontal e melhorias na parte eletrônica. A contribuição deste trabalho visa a estudar e desenvolver piezocompósitos com maior largura de banda para aplicação em transdutores de ultrassom para acoplamento em ar. De modo geral, os piezocompósitos possibilitam um maior fator de acoplamento eletromecânico e uma menor impedância acústica quando comparado às cerâmicas piezelétricas convencionais. Neste trabalho foram realizadas a modelagem, a construção e a caracterização de três tipos de piezocompósitos: piezocompósitos com gradação da densidade, piezocompósitos 2-2, e piezocompósitos 1-3. Naqueles com gradação da densidade, variaram-se os parâmetros profundidade, largura e distribuição dos cortes. O método de elementos finitos foi utilizado para analisar a influência dos parâmetros dos cortes. Os piezocompósitos foram construídos a partir de piezocerâmicas circulares e retangulares. Alguns dos piezocompósitos construídos foram submetidos a experimentos de interferometria a laser, mostrando a variação da distribuição dos deslocamentos máximos na superfície em função da frequência. A partir do espectro de frequência da condutância e dos valores inferiores e superiores da largura de banda foram analisados os deslocamentos máximos nas diversas regiões da superfície dos piezocompósitos. Nos piezocompósitos gradados observou-se que os deslocamentos máximos em determinadas regiões da superfície

do piezocompósito dependiam da frequência de excitação. Desse modo, os piezocompósitos gradados apresentaram fator de acoplamento eletromecânico e largura de banda maiores do que os dos piezocompósitos 1-3. Transdutores com emissão em ar construídos a partir de piezocompósito gradado e do tipo 1-3 foram caracterizados e medidos os parâmetros largura de banda e fator de acoplamento eletromecânico. O transdutor construído a partir do piezocompósito gradado apresentou maior largura de banda quando comparado com o transdutor do tipo 1-3.

Palavras-chave: Transdutores ultrassônicos com emissão em ar, piezocompósitos gradados, modelagem de piezocompósitos, largura de banda.

ABSTRACT

In order to generate and emit a short pulse and receive the echoes with high sensitivity, an ultrasound transducer requires a backing layer to attenuate the signal going backwards and a matching layer to match the acoustical impedances of the piezoceramic and the medium. When compared to liquid coupling, air coupling is further complicated because the large mismatch in acoustic impedance between the ceramic and air results in high losses during transmission and reception of acoustic signals. Certain applications require air-coupling and, therefore, the ultrasonic transducers used must be broadband and have low acoustic impedance. The increase of the bandwidth of a piezoelectric transducer can be achieved with the use of piezocomposites, a back layer, frontal coupling layers and improvements in the electronic part. The contribution of this work aims to study and develop piezocomposites with higher bandwidth for application in ultrasonic transducers with air coupling. In general, the piezocomposites allow a higher electromechanical coupling factor and a lower acoustic impedance when compared to conventional piezoelectric ceramics. In this work, three types of piezocomposites were made: piezocomposites with density gradation, piezocomposites 2-2, and piezocomposites 1-3. In those with density gradation, depth, width and distribution of the cuts were varied. The finite element method was used to analyze the influence of the cut parameters. The piezocomposites were constructed from circular and rectangular piezoceramics. Some of the constructed piezocomposites were submitted to laser interferometry experiments, which showed the variation of the distribution of the maximum displacements in the surface as a function of the frequency. From the frequency spectrum of the conductance curve and of the lower and upper values of bandwidth, the maximum displacements in the various surface regions of the piezocomposites were analyzed. In the graded piezocomposites it was observed that the maximum displacements in certain regions of the surface of the piezocomposite depend on the frequency of excitation. Thus, the graded piezocomposites presented higher electromechanical coupling factor and bandwidth than the piezocomposites 1-3. Air-coupled transducers constructed from graded piezocomposite and type 1-3 were characterized and measured the parameters bandwidth and electromechanical

coupling factor. The transducer constructed from the graded piezocomposite presented higher bandwidth when compared to the type 1-3 transducer.

Keywords: Graded piezocomposites, transducer modeling, air-coupled, ultrasound transducers.

Sumário

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Revisão Bibliográfica.....	3
1.2. Objetivos.....	8
1.3. Contribuição científica.....	9
CAPÍTULO 2: CONCEITOS TEÓRICOS.....	10
2.1. Materiais Piezocompósitos.....	10
2.1.1. Piezocompósito tipo 1-3.....	11
Propriedades Efetivas de um Material Piezocompósito 1-3.....	12
2.1.2. Piezocompósito tipo 2-2.....	14
Propriedades Efetivas de um Material Piezocompósito 2-2.....	15
2.2. Piezeletricidade.....	16
2.3. Transdutores de Ultrassom para Acoplamento em Ar.....	18
2.3.1. Modelagem pelo Método da Matriz Distribuída.....	19
Matriz do Material Piezelétrico.....	21
Matriz da Primeira e da Segunda Camada de Acoplamento Frontal.....	22
Impedância Elétrica do Transdutor.....	22
Função de Transferência de Transmissão.....	23
Função de Transferência de Recepção.....	23
Função de Transferência de Transmissão-Recepção.....	23
2.3.2. Modelagem por Elementos Finitos.....	24
Modelagem Bidimensional no ANSYS.....	26

2.4. Fenômenos de Transmissão.....	28
2.4.1. Transmissão através de uma interface definida entre dois meios.....	28
2.4.2. Transmissão Através de 2 Interfaces definidas por Três Meios para Incidência Normal.....	30
2.4.3. Efeitos da Atenuação no Coeficiente de Transmissão.....	32
2.5. Fator de Acoplamento Eletromecânico Efetivo.....	34
2.6. Largura de Banda.....	35
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1. Caracterização das Cerâmicas Piezelétricas Puras.....	37
3.2. Modelagem de piezocerâmicas puras retangulares usando o modelo de estado plano de deformação.....	39
3.3. Piezocompósitos retangulares com cortes gradados.....	40
3.4. Piezocompósitos circulares.....	44
3.4.1. Piezocompósito circular com cortes em 1 direção.....	45
3.4.2. Piezocompósito circular gradado com cortes em duas direções com ângulo de 90° entre as direções de corte.....	46
3.4.3. Piezocompósito circular gradado com cortes em duas direções com ângulo de 45° entre as direções de corte.....	47
3.4.4. Piezocompósitos com variação da profundidade dos cortes.....	49
3.4.5. Piezocompósitos sem variação da profundidade dos cortes.....	50
3.4.6. Estudo de convergência do modelo tridimensional no ANSYS.....	51
3.5. Caracterização acústica de membranas porosas.....	53
3.6. Transdutores com Emissão em Ar.....	58
3.7. Caracterização por interferometria a laser.....	59
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
4.1. Caracterização das Cerâmicas Piezelétricas.....	61

4.2. Piezocerâmicas Puras Retangulares.....	64
4.3. Caracterização elétrica e por interferometria a laser dos Piezocompósitos.....	69
4.3.1 Piezocompósitos Retangulares com Cortes Gradados do tipo 1.....	70
4.3.2 Piezocompósitos Retangulares com Cortes Gradados do Tipo 2.....	76
4.3.3 Piezocompósitos Retangulares com Cortes Gradados do Tipo 3.....	83
4.3.4. Piezocompósitos Retangulares com Cortes Gradados do Tipo 4.....	88
4.3.5 Piezocompósitos Retangulares com Cortes Gradados do Tipo 2-2.....	94
4.4. Piezocompósitos Circulares.....	101
4.4.1. Piezocompósito Gradado com Cortes em 1 Direção.....	102
4.4.2. Piezocompósito Gradado com Ângulo de 45° entre as Direções de Corte.....	103
4.4.3. Piezocompósito Gradado com Ângulo de 90° entre as Direções de Corte.....	109
4.4.4. Piezocompósito tipo 1-3 com Ângulo de 90° entre as Direções de Corte.....	115
4.5. Resultado da largura de banda e do fator de acoplamento eletromecânico para os piezocompósitos simulados.....	121
4.6. Caracterização das Membranas Porosas.....	123
4.7. Transdutores para Emissão em Ar.....	125
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	132
5.1. Conclusões.....	132
5.2. Trabalhos Futuros.....	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Representação esquemática de uma cerâmica piezelétrica com constante piezelétrica gradada (a) e outra com campo elétrico gradado (b).....	5
Figura 2.2. Piezocompósito 1-3	5
Figura 2.3. Desenho esquemático de um piezocompósito com gradação da velocidade de propagação.	6
Figura 2.4. Desenho esquemático de um piezocompósito 1-3 não-gradado em (a) e um piezocompósito 1-3 gradado em (b). A área hachurada representa o material piezelétrico.	6
Figura 2.5. Exemplos de conectividade em materiais compósitos. O primeiro dígito refere-se à fase de cor cinza e o segundo à fase de cor branca.....	10
Figura 2.6. Configuração do piezocompósito 1-3.....	11
Figura 2.7. Célula unitária de um material piezocompósito 1-3.	12
Figura 2.8. Configuração do piezocompósito 2-2.....	15
Figura 2.9. Representação esquemática de um transdutor de ultrassom para acoplamento em ar.	18
Figura 2.10. Representação esquemática do transdutor	19
Figura 2.11. Modelo de um transdutor de ultrassom constituído de um elemento ativo e duas camadas frontais.	20
Figura 2.12. Insertion loss e resposta impulsiva usando o modelo da matriz distribuída.	24
Figura 2.13. Geometria do material para simulação axissimétrica.....	27
Figura 2.14. Geometria do material para o modelo de estado plano de deformação.	27
Figura 2.15. Reflexão e transmissão de uma onda plana incidindo normalmente numa interface entre dois meios	29
Figura 2.16. Reflexão e transmissão de ondas planas através de três meios.	30
Figura 2.17. Amplitude de onda transmitida através de uma parede (meio 2) imersa num meio com impedância acústica diferente.	32
Figura 2.18. Efeito da atenuação no coeficiente de transmissão.	34
Figura 3.1. Desenho tridimensional do piezocompósito com cortes gradados tipo 1.....	41
Figura 3.2. Foto com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 1.....	41

Figura 3.3. Desenho esquemático com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 1.	41
Figura 3.4. Desenho tridimensional do piezocompósito com cortes gradados tipo 2.	41
Figura 3.5. Foto com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 2.	41
Figura 3.6. Desenho com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 2.	42
Figura 3.7. Desenho tridimensional do piezocompósito com cortes gradados tipo 3.	42
Figura 3.8. Foto com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 3.	42
Figura 3.9. Desenho com as dimensões dos cortes no piezocompósito do tipo 3.	42
Figura 3.10. Desenho tridimensional do piezocompósito com cortes gradados tipo 4.	43
Figura 3.11. Foto com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 4.	43
Figura 3.12. Desenho com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 4.	43
Figura 3.13. Desenho tridimensional do piezocompósito 2-2.	43
Figura 3.14. Figura 3.14. Foto com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 2-2.	43
Figura 3.15. Desenho com as dimensões dos cortes no piezocompósito do tipo 2-2.	44
Figura 3.16. Máquina de corte semiautomática da fabricante Buehler – modelo Isomet 4000.	44
Figura 3.17. Piezocompósitos com cortes em uma direção. (a), (c) e (e) refere-se a um piezocompósito tipo 2-2. (b), (d) e (f) refere-se a um piezocompósito com cortes gradados.	45
Figura 3.18. Fotos do piezocompósito construído com cortes em uma direção (vista superior e vista lateral).	46
Figura 3.19. Piezocompósitos com cortes em duas direção. (a), (c) e (e) referem-se ao piezocompósito tipo 1-3 e (b), (d) e (f) referem-se ao piezocompósito gradado.	47
Figura 3.20. Piezocompósitos com ângulo de 45° entre as direções de cortes. (a), (c) e (e) referem-se ao piezocompósito do tipo 1-3 e (b), (d) e (f) referem-se ao piezocompósito com cortes gradados.	48
Figura 3.21. Foto do piezocompósito construído com cortes gradados em duas direções com ângulo de 45° entre as direções de corte (vista superior).	48
Figura 3.22. Parâmetros geométricos do piezocompósito com um plano de simetria (seção transversal).	49

Figura 3.23. Parâmetros geométricos do piezocompósito com dois planos de simetria (seções transversal e longitudinal)	50
Figura 3.24. Piezocompósito com profundidade de cortes constantes	50
Figura 3.25. Figura 3.25. Malha de um quarto de cerâmica com tamanho de elemento de 0.1 mm.	52
Figura 3.26. Malha de um quarto de cerâmica com tamanho de elemento de 0,2 mm.	52
Figura 3.27. Curvas da condutância para a simulação com elementos de tamanho 0,1 mm e 0,2 mm.	52
Figura 3.28. Curvas da susceptância para a simulação com elementos de tamanho 0,1 mm e 0,2 mm.	53
Figura 3.29. Dispositivo para caracterização das membranas porosas. (a) montagem do dispositivo. (b) medição sem membrana. (c) medição com membrana.	54
Figura 3.30. Desenho esquemático da montagem experimental.	55
Figura 3.31. Sinal do pulso de excitação do transdutor emissor.	55
Figura 3.32. Configuração dos equipamentos para aquisição do sinal.	56
Figura 3.33. Desenho esquemático do transdutor com emissão em ar.	58
Figura 3.34. Montagem experimental do piezocompósito.	59
Figura 3.35. Cabeça de escaneamento do vibrômetro.	60
Figura 4.1. Comparação entre as curvas experimental e simulada do módulo da impedância elétrica para a cerâmica Pz27.	62
Figura 4.2. Comparação entre as curvas experimental e simulada da fase da impedância elétrica para a cerâmica Pz27.	62
Figura 4.3. Comparação entre as curvas experimental e simulada do módulo da impedância elétrica para a cerâmica APC850.	63
Figura 4.4. Comparação entre as curvas experimental e simulada da fase da impedância elétrica para a cerâmica APC850.	63
Figura 4.5. Comparação entre a condutância obtida por simulação tridimensional e a condutância considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 20 mm.	64

Figura 4.6. Comparação entre a susceptância obtida por simulação tridimensional e a susceptância obtida considerando o modelo de estado plano de deformação para a profundidade de 20 mm.....	65
Figura 4.7. Comparação entre a condutância obtida por simulação tridimensional e a condutância considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 30 mm.	65
Figura 4.8. Comparação entre a susceptância obtida por simulação tridimensional e a susceptância obtida considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 30 mm.	66
Figura 4.9. Comparação entre a condutância obtida por simulação tridimensional e a condutância considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 40 mm.	66
Figura 4.10. Comparação entre a susceptância obtida por simulação tridimensional e a susceptância obtida considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 40 mm.	67
Figura 4.11. Comparação entre a condutância obtida por simulação tridimensional e a condutância considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 80 mm.	67
Figura 4.12. Comparação entre a susceptância obtida por simulação tridimensional e a susceptância obtida considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 80 mm.	68
Figura 4.13. Comparação entre a condutância obtida por simulação tridimensional e a condutância considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 160 mm.	68
Figura 4.14. Comparação entre a susceptância obtida por simulação tridimensional e a susceptância obtida considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 160 mm.	69
Figura 4.15. Curva da condutância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.....	70
Figura 4.16. Curva da susceptância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.....	71

Figura 4.17. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 600 a 700 kHz para o piezocompósito com cortes gradados	722
Figura 4.18. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 701 a 800 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.	72
Figura 4.19. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 801 a 900 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.	73
Figura 4.20. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.	74
Figura 4.21. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.	74
Figura 4.22. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.	75
Figura 4.23. Deslocamentos máximos experimentais para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1, quando excitado com a frequência central de 1010 kHz.	76
Figura 4.24. Deslocamentos máximos teóricos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1, quando excitado com a frequência central de 1010 kHz.....	76
Figura 4.25. Curva da condutância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.....	77
Figura 4.26. Curva da susceptância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.....	77
Figura 4.27. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 600 a 700 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.	78
Figura 4.28. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 701 kHz a 800 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.	109
Figura 4.29. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 801 a 900 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.	79
Figura 4.30. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 901 kHz a 1000 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.	80
Figura 4.31. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1001 kHz a 1100 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.	81

Figura 4.32. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1101 kHz a 1200 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.	81
Figura 4.33. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2 quando excitado com a frequência central de 928 kHz.....	82
Figura 4.34. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2 quando excitado com a frequência central de 928 kHz.....	83
Figura 4.35. Curva da condutância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.	83
Figura 4.36. Curva da susceptância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.	84
Figura 4.37. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 600 a 700 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.	84
Figura 4.38. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 701 a 800 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.	85
Figura 4.39. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 801 a 900 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.	85
Figura 4.40. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.	86
Figura 4.41. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.	86
Figura 4.42. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.	87
Figura 4.43. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3 quando excitado com a frequência central de 940 kHz.....	88
Figura 4.44. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3 quando excitado com a frequência central de 940 kHz.....	88
Figura 4.45. Curva da condutância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.	89
Figura 4.46. Curva da susceptância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.	89

Figura 4.47. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 600 a 700 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.	90
Figura 4.48. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 701 e 800 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.	90
Figura 4.49. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 801 a 900 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.	91
Figura 4.50. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.	91
Figura 4.51. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.	92
Figura 4.52. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.	92
Figura 4.53. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4 quando excitado com a frequência central de 1010 kHz.....	93
Figura 4.54. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4 quando excitado com a frequência central de 1010 kHz.....	94
Figura 4.55. Curva da condutância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.....	94
Figura 4.56. Curva da susceptância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.....	95
Figura 4.57. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 600 a 700 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.	95
Figura 4.58. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 701 a 800 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.	96
Figura 4.59. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 801 a 900 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.	97
Figura 4.60. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.	97
Figura 4.61. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.	98

Figura 4.62. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.	99
Figura 4.63. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2 quando excitado com a frequência central de 815 kHz.....	100
Figura 4.64. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2 quando excitado com a frequência central de 817 kHz.....	100
Figura 4.65. Curva da condutância elétrica em função da frequência para o piezocompósito gradado com cortes em uma direção.	102
Figura 4.66. Curva da susceptância elétrica em função da frequência para o piezocompósitos com cortes em uma direção.	103
Figura 4.67. Curva da condutância elétrica em função da frequência para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.	104
Figura 4.68. Curva da susceptância elétrica em função da frequência para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.	104
Figura 4.69. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 600 a 700 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.	105
Figura 4.70. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 701 a 800 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.	106
Figura 4.71. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 801 a 900 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.	106
Figura 4.72. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.	107
Figura 4.73. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.	107

Figura 4.74. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.	108
Figura 4.75. Deslocamentos máximos experimentais para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte, quando excitado a 760 kHz	108
Figura 4.76. Deslocamentos máximos teóricos para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte, quando excitado a 765 kHz.	109
Figura 4.77. Curva da condutância elétrica em função da frequência para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte	109
Figura 4.78. Curva da susceptância elétrica em função da frequência para o piezocompósito com cortes em duas direções com ângulo de 90° entre os cortes.	110
Figura 4.79. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 600 a 700 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.	111
Figura 4.80. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 701 a 800 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.	111
Figura 4.81. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 801 a 900 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.	112
Figura 4.82. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.	112
Figura 4.83. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.	113
Figura 4.84. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.	113
Figura 4.85. Deslocamento experimental na direção de espessura medido a 820 kHz.	114
Figura 4.86. Deslocamento teórico na direção de espessura medido a 786 kHz.	114

Figura 4.87. Curva de condutância elétrica em função da frequência para o piezocompósitos tipo 1-3.	115
Figura 4.88. Curva da susceptância elétrica em função da frequência para o piezocompósitos tipo 1-3.	115
Figura 4.89. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 600 a 700 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.	116
Figura 4.90. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 701 a 800 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.	117
Figura 4.91. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 801 a 900 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.	117
Figura 4.92. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.	118
Figura 4.93. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.	118
Figura 4.94. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.	119
Figura 4.95. Deslocamento experimental na direção de espessura medido a 750 kHz.	119
Figura 4.96. Deslocamento teórico na direção de espessura medido a 732 kHz.	120
Figura 4.97. Dados para a membrana mixed esters. Sinal no tempo com e sem membrana (a). Coeficiente de transmissão teórico e experimental (b).....	124
Figura 4.98. Dados para a membrana nitrate cellulose. Sinal no tempo com e sem membrana (a). Coeficiente de transmissão teórico e experimental (b).....	124
Figura 4.99. Dados para a membrana cellulose ester. Sinal no tempo com e sem membrana (a). Coeficiente de transmissão teórico e experimental (b).....	124
Figura 4.100. Transdutor fabricado com o piezocompósito 1-3.	125
Figura 4.101. Transdutor fabricado com o piezocompósito gradado com cortes a 90° entre as direções de corte.	125
Figura 4.102. Condutância e susceptância do transdutor obtido a partir do piezocompósito 1-3.	126
Figura 4.103. Condutância e susceptância do transdutor obtido a partir do piezocompósito 1-3 com uma camada de acoplamento.....	126

Figura 4.104. Condutância e susceptância do transdutor obtido a partir do piezocompósito 1-3 sem camadas de acoplamento.	128
Figura 4.105. Curvas de condutância e susceptância do transdutor obtido a partir do piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de cortes. São mostradas três curvas: sem camada, com uma camada e com duas camadas.	128
Figura 4.106. Resposta Impulsiva do transdutor piezocompósito do tipo 1-3.	129
Figura 4.107. Transformada de Fourier do sinal (figura 4.98) gerado pelo transdutor piezocompósito do tipo 1-3.	129
Figura 4.108. Resposta Impulsiva do transdutor piezocompósito do tipo gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.	130
Figura 4.109. Transformada de Fourier do sinal (figura 4.98) gerado pelo transdutor piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Valores do ângulo de inclinação dos cortes para o piezocompósito com um plano de simetria.....	49
Tabela 3.2. Valores do ângulo de inclinação dos cortes para o piezocompósito com dois planos de simetria.....	50
Tabela 3.3. Valores da profundidade dos cortes para o piezocompósito com cortes de profundidade constantes.....	49
Tabela 3.4. Dados medidos nas membranas caracterizadas.....	53
Tabela 3.5. Dados das membranas usadas no transdutor.	58
Tabela 4.1. Propriedades da piezocerâmica Pz27.....	61
Tabela 4.2. Propriedades da piezocerâmica APC850.	61
Tabela 4.3. Variação do fator de erro relativo com a profundidade.	614
Tabela 4.4. Largura de banda e fator de acoplamento eletromecânico efetivo para os vários tipos de piezocompósitos com cortes gradados e do tipo 2-2	101
Tabela 4.5. Fator de acoplamento eletromecânico efetivo e largura de banda	120
Tabela 4.6. Largura de banda dos piezocompósitos retangulares com um plano de simetria	121
Tabela 4.7. Largura de banda dos piezocompósitos retangulares com dois planos de simetria	122
Tabela 4.8. Largura de banda dos piezocompósitos retangulares com cortes de profundidade constantes	122
Tabela 4.9. Dados medidos nas membranas caracterizadas.....	123
Tabela 4.10. Parâmetros do modelo da matriz distribuída	127

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

	comprimento de onda
k_t	fator de acoplamento eletromecânico na direção da espessura
Z	impedância acústica
ϵ_r	constante dielétrica relativa
a	largura da barra de cerâmica
p	passo de corte ou largura da célula unitária
t	altura da célula unitária
$\bar{T}_3$	tensão elétrica do piezocompósito 1-3
$\bar{c}_{33}^E$	rigidez elástica do piezocompósito 1-3
$\bar{S}_3$	deformação mecânica do piezocompósito 1-3
$\bar{e}_{33}$	constante piezelétrica do piezocompósito 1-3
$\bar{E}_3$	campo elétrico do piezocompósito 1-3
$\bar{D}_3$	deslocamento elétrico do piezocompósito 1-3
$\bar{\epsilon}_{33}^S$	permissividade elétrica do piezocompósito 1-3
c_{ij}	constantes elásticas do polímero
ϵ_{11}	permissividade elétrica do polímero
c_{ij}^E	constantes elástica a campo constante na cerâmica
e_{ij}	constantes piezelétricas a campo constante na cerâmica
ϵ_{33}^S	permissividade elétrica a deformação constante na cerâmica
v	fração de volume de cerâmica
$\bar{\rho}$	densidade efetiva do compósito
ρ^c	densidade da piezocerâmica

ρ^p	densidade do polímero
$\bar{c}_l$	velocidade de propagação longitudinal efetiva
$\bar{Z}$	impedância acústica efetiva
$\bar{k}_t$	coeficiente de acoplamento eletromecânico efetivo no modo de espessura
f_r	frequência de ressonância
f_{ar}	frequência de anti-ressonância
E	campo elétrico
S	deformação mecânica
c^E	matriz das constantes elásticas a campo elétrico constantes
ε^S	vetor das constantes de permissividade elétrica a deformação constante
e	matriz dos coeficientes piezelétricos
T	vetor das tensões mecânicas
D	vetor deslocamento elétrico
Z_A	impedância acústica da carga
Z_B	impedância acústica da camada de retaguarda
E	gerador de sinais
R_G	resistência interna
V	tensão elétrica no terminal elétrico
I	corrente no terminal elétrico
F	força
v_1	velocidade da partícula no terminal entre a piezocerâmica e a camada
A	matriz do elemento ativo
M_1	matriz da primeira camada de acoplamento frontal
F_1	força no primeiro terminal acústico
v_1	velocidade da partícula o primeiro terminal

F_2	força no segundo terminal acústico
v_2	velocidade da partícula no segundo terminal
M_2	matriz da segunda camada de acoplamento frontal
F_A	força na carga
v_A	velocidade na carga
T	matriz resultante do produto entre as matrizes A , M_1 e M_2
ω	frequência angular
Z_{ele}	impedância elétrica da entrada do transdutor
FTE	função de transferência de transmissão do transdutor
FTR	função de transferência de recepção do transdutor
$FTER$	função de transferência de transmissão-recepção do transdutor
IL	insertion loss do transdutor
$\{u_i\}$	vetor dos deslocamentos nodais
$\{\dot{u}_i\}$	vetor das velocidades nodais
$\{\ddot{u}_i\}$	vetor das acelerações nodais
$[K_{uu}]$	matriz de rigidez
$[K_{u\varphi}]$	matriz de acoplamento piezelétrico
$[K_{\varphi u}]$	matriz de acoplamento piezelétrico
$[C]$	matriz de amortecimento
$[K_{\varphi\varphi}]$	matriz de rigidez dielétrica
$[M]$	matriz de massa
$\{F_P\}$	vetor das forças mecânicas nodais
$\{Q_P\}$	vetor das cargas elétricas nodais
$\{\varphi_i\}$	vetor dos potenciais elétricos nodais
	coeficiente de amortecimento da matriz de massa
	coeficiente de amortecimento da matriz de rigidez

Q_0	amplitude da carga elétrica
M_{UU}	matriz de massa
K_{UU}	matriz de rigidez
T_c	coeficiente de transmissão em termos de amplitude de pressão
R_c	coeficiente de reflexão em termos de amplitude de pressão
T_I	coeficiente de transmissão em termos de intensidade
R_I	coeficiente de transmissão em termos de intensidade
Z_1	impedância acústica do meio 1
Z_2	impedância acústica do meio 2
Z_3	impedância acústica do meio 3
ρ_1	densidade do meio 1
ρ_2	densidade do meio 2
p_i	pressão incidente
p_t	pressão transmitida
p_r	pressão refletida
v_i	velocidade incidente da partícula
v_t	velocidade transmitida da partícula
v_r	velocidade refletida da partícula
L	espessura do meio 2
k_{ef}	fator de acoplamento eletromecânico efetivo
BW	largura de banda
f_s	frequência superior
f_i	frequência inferior
e_r	erro relativo
F_{at}	fator de correção
R	raio da cerâmica
Esp	espessura da cerâmica
Den	densidade da cerâmica

Q	fator de qualidade
1	atenuação devido as perdas no interior da membrana
2	atenuação devido à reflexão nas interfaces

LISTA DE SIGLAS

KLM	modelo unidimensional desenvolvido por Krimholtz, Leedom e Matthaei
ASTM	American Society for Testing and Materials
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
FFT	Fast Fourier Transform

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dos equipamentos que realizam ensaios não destrutivos por ultrassom estão relacionados basicamente com o desenvolvimento dos transdutores. Os transdutores de ultrassom são dispositivos cuja aplicação se dá de forma ampla em diversas áreas, tais como na indústria (ensaios não destrutivos), na medicina (exame diagnóstico) e na área militar (como sonar). Eles podem ser do tipo emissor e/ou receptor de vibrações mecânicas. No primeiro caso, seu uso se deve à capacidade de transformar pulsos elétricos (energia elétrica) em deformações mecânicas (energia mecânica) que excitam o meio e geram a onda ultrassônica. No segundo caso, observa-se que uma onda ultrassônica incide sobre a cerâmica piezelétrica e produz uma deformação mecânica que gera o pulso elétrico (Ramadas *et. al.*, 2014) e (Waag, 2015).

No meio industrial os transdutores de ultrassom permitem a inspeção da qualidade de soldas, a análise de superfícies, a medição da espessura de chapas, a inspeção do interior de materiais sólidos entre outros. Desse modo, o desenvolvimento de novos transdutores de ultrassom possibilita uma gama maior de aplicabilidade dos transdutores de ultrassom no meio industrial.

Normalmente, cada aplicação exige que seja realizado um projeto para que se construa um transdutor específico no qual se deseja obter determinadas características como: frequência de ressonância, largura de banda, fator de acoplamento eletromecânico, diretividade, profundidade de foco, amortecimento mecânico etc. (Kino, 1987). Um emissor acústico deve ter elevada eficiência enquanto que um receptor deve ter alta sensibilidade.

Estas características dependem diretamente do fator de acoplamento eletromecânico do transdutor. Além disso, os sistemas de ensaios não destrutivos por ultrassom requerem resolução axial e lateral, sendo necessário utilizar transdutores de banda larga, ou seja, transdutores que gerem pulsos estreitos.

A aplicação de transdutores em sistemas de ensaios não destrutivos por ultrassom exige algum tipo de líquido que faça o acoplamento do transdutor com a peça a ser inspecionada, a fim de facilitar a transferência de energia mecânica entre eles. O acoplamento pode ser feito a partir de uma camada fina de gel (acoplamento direto), da imersão da peça num banho de água ou do uso de um jato de água pelo

qual a onda ultrassônica se propaga. Entretanto, existem aplicações que inviabilizam esses acoplamentos, pois podem danificar o material em contato com água ou dificultar a automatização (Hayward, 1997). Consequentemente, a remoção do meio de acoplamento e a sua substituição pelo ar torna-se muito vantajosa.

Há transdutores ópticos, magnéticos, capacitivos e piezelétricos que permitem a geração e a detecção de energia ultrassônica através do ar. O transdutor óptico possui como fonte o laser e, geralmente, exige que a amostra tenha uma superfície com acabamento de alta qualidade de modo que a sensibilidade de detecção é relativamente baixa, apesar de esta tecnologia ser bastante utilizada e conhecida. Por outro lado, os transdutores magnéticos necessitam que a amostra seja eletricamente condutiva e a distância entre transdutor e amostra seja muito curta (Hayward e Gachagan, 1996). Os transdutores capacitivos possuem alta sensibilidade e resposta muito larga em frequência e podem ser do tipo convencional ou micromecanizado (Manzanares e Espinosa, 2012). Os convencionais são instáveis com pouca robustez para aplicação no meio industrial enquanto os micromecanizados são caros (Arenas e Espinosa, 2002; Satyanarayan, 2010; Manzanares, 2012). Com a utilização de transdutores do tipo piezelétricos, as restrições impostas pelo acoplamento em ar são consideráveis. A sensibilidade resultante é extremamente baixa devido à atenuação no ar e a grande diferença de impedância acústica entre o transdutor e o ar (Kelly *et al.*, 2004). Contudo, é importante frisar que muitos materiais a serem inspecionados são sólidos que apresentam uma diferença de impedância acústica muito grande em relação ao ar de forma que apresentam como resultado uma baixa transmissão de energia ultrassônica no material (Hsu, 2006).

Transdutores piezelétricos para acoplamento em ar requerem o uso de camadas de acoplamento para parcialmente mitigar a enorme diferença de impedância acústica entre o ar e o elemento piezelétrico. Várias configurações de acoplamento têm sido propostas, tais como: camada única de espessura de um quarto do comprimento de onda ($\lambda/4$) e variações desta configuração ($\lambda/8$ e $(n+1)\lambda/4$), várias camadas de $\lambda/4$, configurações de espessura de meio comprimento de onda ($\lambda/2$), e uma pilha de várias camadas de acoplamento muito finas cujo comprimento total é de $\lambda/4$. Em qualquer dessas configurações, um aspecto chave para o projeto bem sucedido de transdutores para emissão em ar, que possuem

várias camadas de acoplamento frontal, é a impedância acústica da camada mais externa. Ela deve possuir impedância acústica muito baixa, atenuação muito baixa, e espessura para a configuração e frequência projetada (Hsu, 2006) (Arenas, 2004).

A grande diferença de impedância acústica entre o ar e a cerâmica piezelétrica tem duas consequências principais para o projeto de transdutores piezelétricos para acoplamento em ar: a sensibilidade é muito baixa ($\sim -60\text{dB}$) e a largura de banda é muito estreita ($\sim 5\%$). A sensibilidade pode ser melhorada através de uma camada de acoplamento única, mas o aumento da largura de banda em frequência requer o uso de duas ou mais camadas de acoplamento (Arenas, 2004).

1.1. Revisão Bibliográfica

Os desenvolvimentos dos transdutores de acoplamento em ar, na faixa de operação de 300kHz a 3MHz, se devem à melhoria nos projetos dos transdutores. Por exemplo, o desempenho de transdutores convencionais pode ser aumentado pela adição de múltiplas camadas de casamento que possuem impedância acústica e atenuação muito baixa (Arenas, 2004) e também pela utilização de membranas microporosas com poros da ordem de submícron (Kelly, 2001). Em muitos casos são empregadas lentes de focalização e aplicação de altas tensões elétricas de excitação. No entanto, nota-se que permanece a dificuldade inerente à alta impedância acústica da cerâmica piezelétrica (Kelly *et al.*, 2004; Blome *et al.*, 2002; Solodov e Busse, 2007; Svilainis *et al.*, 2013) cuja diminuição pode ser pela utilização de materiais piezocompósitos 1-3 ou compósitos avançados (materiais com gradação da densidade) (Cheng *et al.* 2014).

Os materiais piezocompósitos 1-3 são um tipo de material muito utilizado na fabricação de transdutores de ultrassom devido a apresentarem fator de acoplamento eletromecânico alto ($k \sim 0.6 \sim 0.75$), impedância acústica baixa ($Z < 10 \text{ Mrayls}$) e uma faixa ampla de constante dielétrica ($\epsilon \sim 10-1000$). Esses materiais são formados por pequenos elementos de cerâmica piezelétrica (com geometrias definidas ou aleatórias) inseridos numa matriz de polímero. Assim, eles possibilitam a obtenção de transdutores que apresentam baixa influência dos modos radiais ao preponderarem os modos de espessura (Smith e Auld, 1991).

Um estudo conduzido por Hayward e Gachagan 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 no ar quando comparados com transdutores convencionais. Desse modo, nos transdutores piezocompósitos do tipo 1-3 a rigidez mecânica pode ser ajustada por uma escolha apropriada da proporção em volume do material de preenchimento e da cerâmica (Han e Roh, 1999). Além disso, a otimização do projeto é possível ao variar a forma das barras paralelas de cerâmicas e a sua distribuição. Além disso, é possível ajustar adequadamente a fração de volume para o projeto do emissor e do receptor (Hayward e Gachagan, 1996; Yin *et al.*, 2010).

O desenvolvimento de piezocompósitos com geometrias especiais gradadas representa uma alternativa no sentido de melhorar alguns parâmetros do transdutor tais como impedância acústica, campo acústico e largura de banda. Sanches *et al.* (1990) estudaram um piezocompósito constituído por barras de diferentes seções transversais no qual a dispersão da frequência de ressonância das diferentes barras causou um aumento da banda de frequência de aproximadamente 30% sem perda da sensibilidade.

Para a obtenção de um piezocompósito com maior largura de banda, Yamada *et al.* (1999) desenvolveram um método para obter uma cerâmica piezelétrica com gradação funcional no qual o campo elétrico e a constante piezelétrica sofrem uma gradação na direção da espessura (Yamada *et al.*, 1999). Nesse método, entalhes finos com formato em V, em uma única direção, são feitos em uma das superfícies da cerâmica piezelétrica enquanto a outra superfície é mantida plana. A figura 2.1(a) mostra que para produzir uma cerâmica piezelétrica com uma constante piezelétrica com gradação funcional, um material polimérico é depositado diretamente sobre o entalhe e, então, o eletrodo metálico é evaporado sobre as duas superfícies. Já a Fig. 2.1(b) mostra que para produzir uma cerâmica piezelétrica com um campo elétrico com gradação funcional, um eletrodo metálico é evaporado sobre as duas superfícies após o entalhe. Uma excitação de campo elétrico com gradação é gerada pela aplicação de uma tensão elétrica entre o eletrodo na superfície entalhada em V e a superfície plana não entalhada. As duas configurações permitem gerar um pulso estreito, até mesmo sem a utilização de camadas de acoplamento

acústico, visto que os entalhes eliminam as multirreflexões na cerâmica (Yamada *et al.*, 1999).

Figura 2.1. Representação esquemática de uma cerâmica piezelétrica com constante piezelétrica gradada (a) e outra com campo elétrico gradado (b).

Fonte: Imagens extraídas e adaptadas de: (YAMADA *et al.*, 1999)

Yamada *et al.* (2003) desenvolveram uma nova configuração de piezocompósitos 1-3 em que a excitação do campo elétrico é gradada na direção da espessura. Além das características conhecidas dos piezocompósitos 1-3, o piezocompósito com o campo elétrico gradado tem a capacidade de gerar uma onda de ultrassom de curta duração no tempo. Uma visão parcial do piezocompósito com gradação da tensão piezelétrica é mostrada na figura 2.2. Esses piezocompósitos foram fabricados a partir da técnica de corte e preenchimento. Primeiramente, uma cerâmica piezelétrica polarizada na direção da espessura foi cortada com um disco de corte de 50 μm de espessura. Logo, os rasgos produzidos foram preenchidos com um material polimérico e, após a cura do material polimérico, novos cortes foram feitos usando um disco de corte com formato em v. Então, um eletrodo de Cr-Au foi formado por vaporização à vácuo nas superfícies dos cortes em v. Em seguida, uma mistura de epóxi condutivo e pó de tungstênio foi depositada no interior dos cortes em v para a formação de um contato elétrico entre os pilares de cerâmica.

Figura 2.2. Piezocompósito 1-3

Há reconhecidos trabalhos que comprovam que materiais piezocompósitos com diferentes composições podem ser montados para a obtenção de uma cerâmica piezelétrica na qual as propriedades acústicas variam numa dada direção. Podemos citar, como exemplo, a patente de Fukuda *et al.* (2006) que mostra o processo de fabricação de um compósito cerâmico piezelétrico cuja velocidade de propagação varia na direção radial, como mostra a figura 2.3. Dessa forma, é produzido um transdutor no qual a região central da cerâmica piezelétrica possa transmitir/receber ondas ultrassônicas de alta frequência e a região periférica possa transmitir/receber ondas ultrassônicas de baixa frequência. Uma das aplicações desse compósito é a obtenção de imagens médicas de tecidos superficiais e profundos, utilizando um único transdutor (Fukuda *et al.*, 2006).

Figura 2.3. Desenho esquemático de um piezocompósito com graduação da velocidade de propagação.

Um trabalho realizado por Hirsekorn *et al.* (1999) apresenta a modelagem e a construção de transdutores piezelétricos compósitos 1-3 gradados. A modelagem de tais piezocompósitos é uma extensão da modelagem unidimensional dos piezocompósitos 1-3 convencionais, com o diferencial de que o diâmetro e/ou o número de pilares cerâmicos sofrem variações na direção da espessura para permitir oscilações de banda larga no modo de espessura. Nesse modelo, o compósito gradado é tratado como sendo formado por uma pilha de camadas homogêneas de diferentes propriedades de materiais efetivos, conforme mostrado na figura 2.4.

Figura 2.4. Desenho esquemático de um piezocompósito 1-3 não-gradado em (a) e um piezocompósito 1-3 gradado em (b). A área hachurada representa o material piezelétrico.

Fonte: Imagens extraídas e adaptadas de: (Hirsekorn *et al.*, 2006).

Os transdutores de ultrassom são geralmente modelados a partir de analogias elétricas que consideram o problema de forma unidimensional (modelo do pistão plano). Na modelagem do transdutor e das diversas camadas de casamento de impedância são utilizadas linhas de transmissão acústicas ou eletroacústicas. Essas linhas podem ser matematicamente representadas por matrizes com elementos complexos que levam em consideração as diversas perdas mecânicas e elétricas. Pode-se utilizar o modelo KLM ou da matriz distribuída, adequados à análise por meio de linhas de transmissão (Kino, 1987).

Para simular um material piezelétrico com gradação de algum desses parâmetros, pode-se utilizar o método dos elementos finitos. Este método produz modelos mais próximos de transdutores reais ao envolver análise vibracional tridimensional, porém isso gera um grande custo computacional. Tal técnica é um método numérico bastante conhecido que pode ser utilizado na modelagem de transdutores de ultrassom e também no estudo da propagação de ondas acústicas em meios fluidos e sólidos (Andrade, 2004).

Existem compósitos piezelétricos multifrequência que aumenta o comprimento de banda em relação aos piezocompósitos 2-2 convencionais. Sánchez *et al.* (1999) propuseram piezocompósitos multifrequências do tipo 2-2 em que a largura dos pilares de polímero variavam ordenadamente de duas formas e a largura, espessura e comprimento dos pilares de piezocerâmica eram constantes. Os autores mostraram o aumento da largura de banda em frequência sem perda significativa da sensibilidade.

Wu *et al.* (2000) propuseram a otimização paramétrica de piezocompósitos do tipo 2-2 usando um modelo unidimensional, com o objetivo de aumentar a largura de banda. Nesse tipo de piezocompósitos, os parâmetros alterados foram a largura dos pilares do polímero e da piezocerâmica. Os autores encontraram a configuração de piezocompósitos que apresentavam uma vibração homogênea tanto na fase de polímero quanto na de piezocerâmica e um aumento do fator de acoplamento eletromecânico.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver piezocompósitos circulares com gradação da densidade na direção radial e piezocompósitos retangulares com gradação de densidade ao longo da largura. Tais piezocompósitos têm aplicabilidade na construção de transdutores de ultrassom com acoplamento em ar para ensaios não destrutivos. Embora o enfoque principal deste trabalho seja a construção de piezocompósitos com gradação da densidade, a construção de piezocompósitos dos tipos 1-3 e 2-2 também é abordada com a finalidade de comparação de resultados.

Além disso, foram estudados materiais que resultam em melhor casamento de impedância acústica entre o piezocompósito e o ar. O melhor material foi usado na construção de protótipos de transdutores para acoplamento em ar, possibilitando, assim, a máxima transmissão de energia ao meio externo.

1.3. Contribuição científica

A contribuição científica deste trabalho foi a obtenção de piezocompósitos gradados com maior largura de banda quando comparados a piezocompósitos tradicionais (tipos 1-3 e 2-2). Tais piezocompósitos podem ser aplicados em transdutores de ultrassom para acoplamento em ar. Foram testados diferentes tipos de gradação até que se obtivessem deslocamentos máximos em função da frequência. Foram simulados e construídos piezocompósitos gradados com cortes inclinados, em função de um ângulo de inclinação, e simétricos, em relação a um plano de simetria e a dois planos de simetria. Foi constatado que a largura de banda aumentou no piezocompósito construído com cortes simétricos a dois planos. Finalmente, dois transdutores para acoplamento em ar foram desenvolvidos usando um piezocompósito gradado e um piezocompósito 1-3 (não gradado, a título de comparação).

CAPÍTULO 2: CONCEITOS TEÓRICOS

2.1. Materiais Piezocompósitos

Um material compósito é uma mistura de dois ou mais materiais diferentes sendo que ambos constituintes devem ter proporções geralmente maior que 5% e, dessa maneira, devem apresentar propriedades diferentes. Assim, um piezocompósito pode ser considerado como sendo um material compósito visto que atende esses requisitos de composição. Geralmente este tipo de material é constituído por um material piezocerâmico imerso em uma matriz polimérica.

Os materiais piezocompósitos podem ser de diferentes tipos dependendo da conectividade entre as fases constituintes. Para a identificação do tipo de conectividade existe uma nomenclatura que é mostrada na figura 2.5. A conectividade é uma característica importante no desenvolvimento de propriedades em materiais multifásicos porque as propriedades físicas podem mudar dependendo da maneira em que as conexões são feitas. Para um material piezocompósito, constituído de uma fase cerâmica e uma fase polimérica, a representação se dá através de dois dígitos, um para cada fase. Cada fase em um piezocompósito pode ser conectada em zero, uma, duas ou três dimensões. Para o caso de um material bifásico existem 10 conectividades possíveis, a saber: 0-0, 1-0, 2-0, 3-0, 1-1, 2-1, 3-1, 2-2, 3-2 e 3-3. Algumas dessas conectividades são ilustradas na figura 2.5, usando um cubo como bloco de construção básico. Um padrão de conectividade 2-1, por exemplo, tem uma fase conectada em camadas bidimensionais e a outra conectada em uma única direção. Já na conectividade 1-3, uma fase está conectada tridimensionalmente e a outra em uma dimensão (Newnham *et al*, 1980).

Figura 2.5. Exemplos de conectividade em materiais compósitos. O primeiro dígito refere-se à fase de cor cinza e o segundo à fase de cor branca.

Para a fabricação de piezocompósitos dos tipos 2-2 e 1-3 em pequena escala, a técnica de corte e preenchimento é o método de fabricação mais utilizado. Nessa técnica, as ranhuras são feitas em um material cerâmico e um polímero é depositado no interior dessas ranhuras.

2.1.1. Piezocompósito tipo 1-3

Um piezocompósito 1-3 é mostrado na figura 2.6. Ele consiste de barras periódicas de cerâmica nas direções X_1 e X_2 . A direção de operação é também a direção de polarização e é ao longo de X_3 . Tais piezocompósitos apresentam um melhor acoplamento eletromecânico no modo de espessura ($k_t \sim 0,6 \div 0,75$), impedância acústica baixa ($Z < 10 \text{ Mrayls}$) e constante dielétrica relativamente alta ($\epsilon_r \sim 10 - 1000$).

Figura 2.6. Configuração do piezocompósito 1-3.

O piezocompósito 1-3 por ser um material periódico é composto por células unitárias. A partir da célula unitária é possível determinar a fração de volume que é um parâmetro importante para a determinação das propriedades efetivas do piezocompósito. Ele indica a razão entre o volume de cerâmica e o volume total da célula unitária e é dada por $\nu = \frac{a^2}{p^2}$, onde a é a largura da barra de cerâmica e p é o passo de corte (ou largura da célula unitária). A figura 2.7 mostra o desenho esquemático de uma célula unitária.

Figura 2.7. Célula unitária de um material piezocompósito 1-3.

Outro parâmetro importante a ser levado em consideração na construção de piezocompósitos do tipo 1-3 é a razão de aspecto, a qual é dada pela razão entre a altura da célula unitária t e sua dimensão lateral a . Para que a face do compósito vibre uniformemente, é necessário que a razão de aspecto seja suficientemente elevada (Geng e Zhang, 1999). Segundo estudos desenvolvidos por Andrade (Andrade, 2006), utilizando o método dos elementos finitos na modelagem de piezocompósitos 1-3 e 2-2, para uma razão de aspecto $t/a \geq 2$ a vibração da face é praticamente uniforme, ou seja, o modo de vibração lateral não atua sobre o modo de espessura.

Propriedades Efetivas de um Material Piezocompósito 1-3

A modelagem de um material piezocompósito do tipo 1-3 pode ser feita através de um modelo físico simples proposto por Smith (Smith, 1991). Nesse modelo, são determinadas as propriedades efetivas que influenciam as vibrações no modo de espessura, a partir de expressões que consideram a fração volumétrica e as propriedades da cerâmica piezelétrica e do polímero. O modelo considera o piezocompósito como um meio homogêneo quando a largura e o espaçamento entre os pilares cerâmicos são bem menores que todos os principais comprimentos de onda na região de ressonância no modo de espessura. Caso contrário, surgirão ondas de ressonância na direção lateral que poderão ser refletidas pela periodicidade lateral do espaçamento entre as barras. Essas ondas laterais introduzem ressonâncias na resposta em frequência do compósito invalidando o tratamento como um meio homogêneo (Smith, 1991).

As relações constitutivas de um compósito 1-3 considerado como um meio homogêneo são:

$$\bar{T}_3 = \bar{c}_{33}^E \bar{S}_3 - \bar{e}_{33} \bar{E}_3 \quad (2.1)$$

$$\bar{D}_3 = \bar{e}_{33} \bar{S}_3 + \bar{\varepsilon}_{33}^S \bar{E}_3 \quad (2.2)$$

Nessas relações, $\bar{T}_3$ é a tensão elétrica, $\bar{c}_{33}^E$ é a rigidez elástica, $\bar{S}_3$ é a deformação mecânica, $\bar{e}_{33}$ é a constante piezelétrica, $\bar{E}_3$ o campo elétrico, $\bar{D}_3$ o deslocamento elétrico e $\bar{\varepsilon}_{33}^S$ a permissividade elétrica. A utilização do traço sobrescrito em cima de cada constante ou variável indica propriedade efetiva ou valor médio.

Em que,

$$\bar{c}_{33}^E = \nu \left[c_{33}^E - \frac{2(1-\nu)(c_{13}^E - c_{12}^E)^2}{\nu(c_{11} + c_{12}) + (1-\nu)(c_{11}^E + c_{12}^E)} \right] + (1-\nu)c_{11} \quad (2.3)$$

$$\bar{e}_{33} = \nu \left[e_{33} - \frac{2(1-\nu)e_{31}(c_{13}^E - c_{12}^E)}{\nu(c_{11} + c_{12}) + (1-\nu)(c_{11}^E + c_{12}^E)} \right] \quad (2.4)$$

$$\bar{\varepsilon}_{33}^S = \nu \left[\varepsilon_{33}^S + \frac{2(1-\nu)(e_{31})^2}{\nu(c_{11} + c_{12}) + (1-\nu)(c_{11}^E + c_{12}^E)} \right] + (1-\nu)\varepsilon_{11} \quad (2.5)$$

As constantes c_{ij} e ε_{11} são as constantes elástica e a permissividade elétrica do polímero, respectivamente. As constantes c_{ij}^E , e_{ij} e ε_{33}^S são as constantes elástica a campo elétrico constante, as constantes piezelétricas e a permissividade elétrica a deformação constante na fase cerâmica, respectivamente. A variável ν é a fração de volume de cerâmica.

A densidade efetiva do compósito é dada por:

$$\bar{\rho} = \nu\rho^c + (1-\nu)\rho^p \quad (2.6)$$

onde v é a fração de volume, ρ^c é densidade da piezocerâmica e ρ^p é a densidade do polímero.

As equações (2.3), (2.4) e (2.5) podem ser inseridas nas equações utilizadas na análise de oscilações no modo de espessura para placa piezelétrica delgada e, dessa forma, calcular a velocidade de propagação longitudinal efetiva ($\bar{c}_l$) na direção x_3 , a impedância acústica efetiva ($\bar{Z}$) e o coeficiente de acoplamento eletromecânico efetivo ($\bar{k}_t$) do modo de espessura de um compósito 1-3 homogêneo. Tais equações são mostradas abaixo:

$$\bar{c}_l = \sqrt{\frac{\bar{c}_{33}^D}{\rho}} \quad (2.7)$$

$$\bar{Z} = \bar{\rho} \bar{c}_l \quad (2.8)$$

$$\bar{k}_t = \frac{\bar{e}_{33}}{\sqrt{\bar{c}_{33}^D \bar{\epsilon}_{33}^S}} \quad (2.9)$$

onde,

$$\bar{c}_{33}^D = \bar{c}_{33}^E + \frac{\bar{e}_{33}^2}{\bar{\epsilon}_{33}^S} \quad (2.10)$$

Detalhes das equações apresentadas nesta seção podem ser encontrados no artigo de *Smith* (1991).

2.1.2. Piezocompósito tipo 2-2

Um compósito tipo 2-2 é mostrado na figura 2.8. Ele consiste em camadas periódicas de cerâmica e polímero na direção X_1 . A direção de operação, que é também a direção de polarização, é ao longo de X_3 . Devido à natureza periódica dos transdutores compósitos 2-2, há modos laterais de vibração associados com o tamanho das barras de cerâmicas, os quais podem acoplar com o modo de vibração em espessura, reduzindo o fator de acoplamento eletromecânico (Qi e Cao, 1996).

Figura 2.8. Configuração do piezocompósito 2-2.

Propriedades Efetivas de um Material Piezocompósito 2-2

As relações constitutivas de um compósito 2-2 considerado como um meio homogêneo são:

$$\bar{T}_3 = \bar{c}_{33}^E \bar{S}_3 - \bar{e}_{33} \bar{E}_3 \quad (2.11)$$

$$\bar{D}_3 = \bar{e}_{33} \bar{S}_3 + \bar{\epsilon}_{33}^S \bar{E}_3 \quad (2.12)$$

Usando a teoria do meio efetivo apresentada por Smith (1991), as propriedades do piezocompósito 2-2, tais como fator de acoplamento eletromecânico $\bar{k}_t$, impedância acústica $\bar{Z}$, velocidade de propagação da onda longitudinal $\bar{c}_l$ e frequência de ressonância f_r , podem ser obtidas através das equações mostradas a seguir:

$$\bar{k}_t = \frac{\bar{e}_{33}}{c_{33}^D \bar{\epsilon}_{33}^S} \quad (2.13)$$

$$\bar{Z} = \sqrt{c_{33}^D \bar{\rho}} \quad (2.14)$$

$$\bar{c}_l = \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\bar{\rho}}} \quad (2.15)$$

$$f_r = \frac{\bar{c}_l}{2t} \quad (2.16)$$

onde c_{33}^D é a constante elástica medida com deslocamento elétrico constante, $\bar{\rho}$ é a densidade efetiva e t é a espessura do piezocompósito.

A obtenção das equações (2.13), (2.14), (2.15), e (2.16) podem ser encontradas em (Qi e Cao, 1996).

2.2. Piezeletricidade

A piezeletricidade é uma interação não linear entre um sistema elétrico e um sistema mecânico. Assim, um material piezelétrico sofre uma deformação mecânica quando um campo elétrico é aplicado e o inverso também pode ser considerado, ou seja, da mesma forma ocorre uma deformação elétrica no material quando submetido a uma tensão mecânica. Para tanto, é importante frisar que neste tipo de material, a tensão mecânica e o deslocamento elétrico dependem da deformação e do campo elétrico. As equações constitutivas relacionando essas grandezas, tendo como variáveis independentes o campo elétrico $\mathbf{E}$ e a deformação $\mathbf{S}$, são (Ikeda, 1996):

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^t \mathbf{E} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e} \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{E} \quad (2.18)$$

onde $\mathbf{c}^E$ é a matriz das constantes elásticas medidas a campo elétrico constante, $\boldsymbol{\varepsilon}^S$ é o vetor das constantes de permissividade elétrica medidas a deformação constante, $\mathbf{e}$ é a matriz dos coeficientes piezelétricos, $\mathbf{S}$ é o vetor de deformação mecânica, $\mathbf{T}$ é o vetor das tensões mecânicas e $\mathbf{D}$ é o vetor deslocamento elétrico. O sobrescrito t indica a transposta da matriz.

Em um sistema mecânico, a deformação S_{ij} e o deslocamento u_i são relacionados através da seguinte equação:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.19)$$

Os tensores das equações constitutivas podem ser escritos em forma de vetor ou matriz através da utilização da notação reduzida. Considerando um material piezelétrico de classe de simetria 6 mm, os vetores e as matrizes das equações constitutivas (2.17) e (2.18) podem ser representados da seguinte forma (Auld, 1973; Rosenbaum, 1988):

$$D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\varepsilon^S = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$c^E = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^E & c_{22}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^E \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

2.3. Transdutores de Ultrassom para Acoplamento em Ar

Um transdutor piezelétrico de ultrassom para acoplamento em ar é mostrado na figura 2.9 e é basicamente composto de um elemento ativo, uma camada de retaguarda (ou ar) e duas camadas de acoplamento frontal. O elemento ativo pode ser uma cerâmica piezelétrica convencional ou um piezocompósito. O acoplamento entre o elemento ativo e o meio externo (ar) é feito por meio de duas camadas, sendo uma camada de epóxi e uma membrana porosa. E a camada de retaguarda é o ar. Como os transdutores com emissão em ar são ressonantes, utiliza-se geralmente uma camada de cortiça em volta do elemento ativo, a fim de aumentar o amortecimento e evitar a ressonância da carcaça do transdutor com o elemento ativo.

Figura 2.9. Representação esquemática de um transdutor de ultrassom para acoplamento em ar.

Yano *et al.* (1987) projetaram transdutores com emissão em ar de frequência central de 1 MHz, a partir de camadas de acoplamento frontais de espessura de um quarto de comprimento de onda.

Nas próximas seções (2.3.1, 2.3.2) são apresentados os fundamentos teóricos da modelagem de transdutores com emissão em ar. Na seção 2.3.1 é abordada a modelagem unidimensional através do modelo da matriz distribuída. Na seção 2.3.2, são descritas sucintamente a modelagem bidimensional e tridimensional usadas no método dos elementos finitos.

Nas seções 2.4, 2.5 e 2.6 são apresentadas, respectivamente, a teoria sobre fenômenos de transmissão, fator de acoplamento eletromecânico efetivo e largura de banda.

2.3.1. Modelagem pelo Método da Matriz Distribuída

Para calcular a resposta impulsiva, a impedância elétrica e a resposta em frequência de um transdutor ultrassônico, pode-se utilizar o modelo da matriz distribuída que trabalha no domínio da frequência. A resposta impulsiva é obtida através da transformada de Fourier inversa. Nesse modelo, o transdutor piezelétrico (ou piezocompósito) é representado por meio de modelos de linhas de transmissão acústicas ou eletroacústicas (Lamberti *et al.*, 1987). Consideram-se o material piezelétrico ou piezocompósito como elemento ativo do transdutor e as camadas de acoplamento frontais como elementos passivos.

A Figura 2.10 mostra a representação esquemática de um transdutor composto por um elemento ativo, e duas camadas de acoplamento frontal. A camada de retaguarda e o meio externo são indicados pelas impedâncias acústicas Z_B e Z_A , respectivamente.

Figura 2.10. 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 Figura 2.11.

Figura 2.11. Modelo de um transdutor de ultrassom constituído de um elemento ativo e duas camadas frontais.

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). Já a porta elétrica representa a interação elétrica entre o material ativo e o circuito de excitação, composto por um gerador de sinais (E) com resistência interna (R_G). Existem ainda dois terminais acústicos intermediários que representam a interação acústica entre o elemento ativo e a primeira camada de acoplamento frontal e a interação entre a primeira e a segunda camada de acoplamento frontal.

O modelo da matriz distribuída permite representar o elemento ativo e cada uma das camadas de acoplamento frontais por meio de matrizes. A matriz que representa o material piezelétrico, 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 o elemento ativo e a primeira camada de acoplamento do transdutor. Essa relação é representada por:

$$\begin{pmatrix} V \\ I \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} F_1 \\ v_1 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

em que A corresponde a matriz do elemento ativo. Já a matriz M_1 , que representa a primeira camada de acoplamento frontal, relaciona a força (F_1) e a velocidade da partícula (v_1), no primeiro terminal acústico com a força (F_2) e a velocidade da partícula (v_2) em sua face da direita, pela seguinte equação:

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} F_2 \\ v_2 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

A matriz M_2 , que representa a segunda camada de acoplamento frontal, relaciona a força (F_2) e a velocidade da partícula (v_2) com a força (F_A) e a velocidade (v_A) na carga, pela seguinte equação:

$$\begin{pmatrix} F_2 \\ v_2 \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} F_A \\ v_A \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Assim, substituindo primeiramente a Eq. (2.29) na Eq. (2.28), e depois na Eq. (2.27), acha-se a relação entre a corrente (I) e a tensão elétrica (V) no terminal elétrico com a força (F_A) e a velocidade da partícula (v_A) na carga, dada por:

$$\begin{pmatrix} V \\ I \end{pmatrix} = A M_1 M_2 \begin{pmatrix} F_A \\ v_A \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} F_A \\ v_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_A \\ v_A \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

em que a matriz T é o resultado do produto entre as matrizes A , M_1 e M_2 . A seguir, são definidos os componentes de cada uma dessas matrizes, bem como a impedância elétrica do transdutor e suas funções de transferência na emissão, recepção e emissão-recepção.

Matriz do Material Piezelétrico

Apesar da matriz A ser definida para materiais piezelétricos, ela também pode ser usada para materiais piezocompósitos tratados como meios homogêneos efetivos. No caso do piezocompósito 1-3, considera-se um meio homogêneo quando a escala lateral do compósito é suficientemente pequena em relação ao

comprimento de onda. Nesse caso, deve-se utilizar as propriedades efetivas do piezocompósito. A matriz A é dada por:

$$A = \frac{1}{\cos(\beta) - 1 + j\zeta \sin(\beta)} \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon_{33}^S}{e_{33} C_0} & \frac{e_{33}}{j\omega \varepsilon_{33}^S} \\ \frac{j\omega \varepsilon_{33}^S}{e_{33}} & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos(\beta) + j\zeta \sin(\beta) & -Z_A [\zeta \cos(\beta) + j \sin(\beta)] \\ \frac{\sin(\beta)}{jZ_A} & 2[\cos(\beta) - 1] + j\zeta \sin(\beta) \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

onde $\beta = \omega L_c / c_c$, $\zeta = Z_B / Z_A$, $Z_A = \rho_A c_A A_c$, $Z_B = \rho_B c_B A_c$ e $C_0 = \varepsilon_{33}^S A_c / L_c$ é a capacitância da cerâmica. A espessura, a área transversal e a velocidade de propagação da onda no elemento ativo são representadas, respectivamente, por L_c , A_c e C_c . A impedância acústica do piezocompósito e do meio de retaguarda são iguais a Z_B e Z_C , respectivamente. Finalmente, as constantes dielétrica e piezelétrica e a frequência angular são representadas, respectivamente, por ε_{33}^S , e_{33} e ω .

Matriz da Primeira e da Segunda Camada de Acoplamento Frontal

Considerando a camada de acoplamento frontal com espessura L_{mi} , velocidade de propagação c_{mi} e impedância acústica Z_{mi} , a matriz M_i é dada por:

$$M_i = \begin{pmatrix} \cos(\beta_{mi}) & jZ_{mi} \sin(\beta_{mi}) \\ \frac{j}{Z_{mi}} \sin(\beta_{mi}) & \cos(\beta_{mi}) \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

onde $\beta_{mi} = L_{mi} / c_{mi}$, sendo $i=1$ para a primeira camada e $i=2$ para a segunda camada.

Impedância Elétrica do Transdutor

A impedância elétrica da entrada do transdutor (Z_{ele}) é obtida a partir da substituição da equação de impedância acústica $F_A = Z_A v_A$ na Eq. (2.30), sendo dada por:

$$Z_E = \frac{V}{I} = \frac{T_{12} + T_{11}Z_A}{T_{22} + T_{21}Z_A} \quad (2.33)$$

onde T_{ij} são os elementos da matriz T obtidos pelo produto matricial mostrado na Eq. (2.30).

Função de Transferência de Transmissão

A função de transferência de transmissão do transdutor é obtida dividindo a força aplicada na carga (meio de propagação) (F_A) pela diferença de potencial aplicada pelo gerador elétrico (E), sendo representada por:

$$FTE = \frac{F_A}{E} = \frac{Z_A}{T_{11}Z_A + T_{12} + R_G(T_{21}Z_A + T_{22})} \quad (2.34)$$

onde R_G é a resistência elétrica do gerador de tensão E .

Função de Transferência de Recepção

A função de transferência de recepção do transdutor é obtida da divisão da queda de tensão sobre o resistor (R_R) pela força aplicada na segunda camada de acoplamento (F_A), sendo representada por:

$$FTR = \frac{V_R}{F_A} = \frac{R_R}{T_{22}R_R + T_{12}} \quad (2.35)$$

Função de Transferência de Transmissão-Recepção

Essa função existe quando a onda acústica emitida por um transdutor é recebida por um transdutor receptor. Nesse caso, a função de transferência de transmissão-recepção é dada pelo resultado da divisão da queda de tensão sobre o resistor do transdutor receptor (R_R) pela diferença de potencial aplicada pelo gerador elétrico (E) no transdutor transmissor. Ela pode ser representada por:

$$FTER = \frac{V_R}{E} = \frac{Z_A}{T_{11}Z_A + T_{12} + R_G(T_{21}Z_A + T_{22})} \frac{2R_R}{T_{11}Z_A + T_{12} + R_R(T_{21}Z_A + T_{22})} \quad (2.36)$$

A figura 2.12 mostra a *insertion loss* (IL) e a resposta impulsiva da FTER (pulso-eco) do transdutor de 1 MHz com uma única camada frontal de espessura de um quarto de comprimento de onda apresentado no artigo de Yano *et al.* (1987). Foi utilizado o modelo da matriz distribuída descrito acima. A curva da resposta impulsiva simulada neste trabalho apresenta uma boa concordância com a obtida no artigo de Yano *et al.*

Figura 2.12. Insertion loss e resposta impulsiva usando o modelo da matriz distribuída.

2.3.2. Modelagem por Elementos Finitos

No método de elementos finitos, o domínio do problema é dividido em subdomínios chamados de elementos finitos, os quais são constituídos por nós na malha. Os graus de liberdade do elemento são definidos nos nós e durante a modelagem as condições de contorno são aplicadas nos nós. No caso dos materiais

piezelétricos, após o processamento visa se obter os deslocamentos e o potencial elétrico em cada nó do domínio.

A utilização do método dos elementos finitos na análise de materiais piezelétricos depende do princípio variacional. O princípio variacional estabelece a cada momento o equilíbrio da energia potencial e cinética em todos os nós da malha. A divisão da estrutura em áreas discretas é uma aproximação, implicando que a vibração é completamente determinada pela composição de vibrações únicas para um conjunto de pontos finitos. Os deslocamentos mecânicos u e as forças F , assim como os potenciais elétricos e as cargas Q , são determinados apenas nos nós desses elementos. Já os valores dessas quantidades mecânicas e elétricas, em uma posição arbitrária no elemento, são dados por uma combinação linear de funções de interpolação polinomial.

A seguinte equação descreve o deslocamento mecânico e o potencial elétrico nos nós quando usando os elementos finitos.

$$[M]\{\ddot{u}_i\} + [C]\{\dot{u}_i\} + [K_{uu}]\{u_i\} + [K_{u\varphi}]\{\varphi_i\} = \{F_P\} \quad (2.37)$$

$$[K_{\varphi u}]\{u_i\} + [K_{\varphi\varphi}]\{\varphi_i\} = \{Q_P\} \quad (2.38)$$

onde, $\{u_i\}$ é o vetor dos deslocamentos nodais, $\{\dot{u}_i\}$ o vetor das velocidades nodais, $\{\ddot{u}_i\}$ é o vetor das acelerações nodais, $[K_{uu}]$ é a matriz de rigidez, $[K_{u\varphi}]$ e $[K_{\varphi u}]$ são as matrizes de acoplamento piezelétrico, $[C]$ é a matriz de amortecimento, $[K_{\varphi\varphi}]$ é a matriz de rigidez dielétrica, $[M]$ é a matriz de massa, $\{F_P\}$ é o vetor das forças mecânicas nodais, $\{Q_P\}$ é o vetor das cargas elétricas nodais e $\{\varphi_i\}$ é o vetor dos potenciais elétricos nodais.

Na modelagem de piezocompósitos, o domínio do material passivo (geralmente um polímero) é também dividido em subdomínios de elementos finitos. Nesse caso, os efeitos elétricos nesses elementos podem ser ignorados e as equações do elemento finito individual são expressas por:

$$[M]\{\ddot{u}_i\} + [C]\{\dot{u}_i\} + [K_{uu}]\{u_i\} = \{F\} \quad (2.39)$$

Nas equações 2.37 e 2.39 a matriz de amortecimento $[C]$ é aproximada pela relação de Rayleigh, conforme a seguinte expressão:

$$[C] = \alpha [M_{UU}] + \beta [K_{UU}] \quad (2.40)$$

onde α e β são constantes relacionando a matriz de amortecimento, respectivamente, com as matrizes de massa e de rigidez. Considerando-se um amortecimento viscoso, a constante β é igual a zero (Nader, 2002; Naillon, 1983; Lerch, 1990).

Utilizando o método dos elementos finitos é possível a obtenção da curva de impedância elétrica dos materiais piezelétricos. Determina-se a carga elétrica nos nós acoplados que definem um dos eletrodos não aterrado. No caso de uma análise harmônica, a carga elétrica e a corrente elétrica são representadas pelas seguintes equações:

$$Q(t) = Q_0 e^{-j\omega t} \quad (2.41)$$

onde Q_0 é a amplitude da carga elétrica.

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -j\omega Q(t) \quad (2.42)$$

A obtenção da impedância elétrica é dada por:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.43)$$

em que V é a diferença de potencial elétrico aplicado no material piezelétrico.

Modelagem bidimensional no ANSYS

Neste trabalho, para modelagem bidimensional, foram utilizados os modelos axissimétrico e de estado plano de deformação disponíveis no software ANSYS.

A modelagem axissimétrica parte do princípio que um modelo tridimensional e seu carregamento podem ser gerados pela revolução de uma seção 2-D em 360° sobre o eixo y , conforme mostrado na figura 2.13.

Figura 2.13. Geometria do material para simulação axissimétrica.

Na modelagem axissimétrica o eixo de simetria deve coincidir com o eixo y global e a geometria tem de estar no eixo x positivo do plano x - y . A direção y é axial, e as direções x e z são radiais. O deslocamento na direção z é nulo. As tensões e deformações na direção z são geralmente muito significativas.

Para a simulação com o modelo de estado plano de deformação, considere o seguinte desenho esquemático abaixo representando um sólido a ser modelado de forma bidimensional por elementos finitos. Na figura 2.14, **A** representa a altura, **S** a largura e **P** a profundidade.

Figura 2.14. Geometria do material para o modelo de estado plano de deformação.

Na modelagem de estado plano de deformação, considera-se não haver deformação na direção z e é aplicada em estruturas onde a dimensão z é muito maior do que as dimensões x e y . A tensão na direção z é não-nula. É encontrado aplicação em estruturas de seção transversal constante e longa.

2.4. Fenômenos de Transmissão

Ondas de reflexão e transmissão são geradas quando uma onda acústica, percorrendo um determinado meio, encontra a interface de outro meio com impedância acústica diferente. A razão entre a amplitude de pressão (ou intensidade) da onda refletida/transmitida com relação à amplitude (ou intensidade) da onda incidente depende da impedância acústica característica dos meios de propagação. A impedância acústica característica de um meio sólido, líquido ou gasoso é definida como $Z = \rho c$, onde ρ é a densidade e c a velocidade de propagação no meio. Os coeficientes de transmissão T_c e reflexão R_c em termos de amplitude de pressão são definidos como (Kinsler, 1982):

$$T_c = \frac{P_t}{P_i} \quad (2.44)$$

$$R_c = \frac{P_r}{P_i} \quad (2.45)$$

onde P_i é a amplitude de pressão incidente, P_t é a amplitude de pressão transmitida e P_r é a amplitude de pressão refletida.

Já os coeficientes de transmissão e reflexão em termos de intensidade são definidos por:

$$T_I = \frac{Z_1}{Z_2} |T_c|^2 \quad (2.46)$$

$$R_I = |R_c|^2 \quad (2.47)$$

onde Z_1 é a impedância acústica do meio 1 e Z_2 é a impedância acústica do meio 2.

2.4.1. Transmissão através de uma interface definida entre dois meios

Considere uma interface plana na posição $x = 0$ localizada entre o meio 1 de impedância acústica Z_1 e o meio 2 de impedância acústica Z_2 .

Figura 2.15. Reflexão e transmissão de uma onda plana incidindo normalmente numa interface entre dois meios

Suponha que uma onda plana se propague no meio 1 e incida normalmente sobre a interface entre os dois meios, com uma pressão p_i . Então, uma parte da onda é refletida com amplitude de pressão p_r e a outra é transmitida com amplitude de pressão p_t .

Existem duas condições de contorno que devem ser satisfeitas em todos os pontos na interface entre os dois meios. A primeira condição é que as pressões acústicas em ambos os lados da interface sejam iguais (lei da continuidade da pressão) e a segunda é que as velocidades das partículas normais à interface sejam iguais (lei da continuidade da velocidade). Sendo assim, as duas condições de contorno são:

$$p_i + p_r = p_t \quad \text{em } x = 0 \quad (2.48)$$

$$v_i + v_r = v_t \quad \text{em } x = 0 \quad (2.49)$$

onde v_i , v_r e v_t são a velocidade da partícula na incidência, na reflexão e na transmissão, respectivamente. Com essas duas condições de contorno, o sistema de equações que descreve o problema é facilmente obtido, envolvendo os coeficientes de reflexão e transmissão da onda acústica.

Para incidência normal, o coeficiente de reflexão R_c em termos de amplitude é representado por:

$$R_c = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.50)$$

E como $1 + R_c = T_c$, tem-se o coeficiente de transmissão dado por:

$$T_c = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.51)$$

Assim, os coeficientes de intensidade de reflexão R_I e de transmissão T_I podem ser definidos como:

$$R_I = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (2.52)$$

$$T_I = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.53)$$

2.4.2. Transmissão Através de 2 Interfaces definidas por Três Meios para Incidência Normal

Para analisar o fenômeno de transmissão entre três meios, considera-se interfaces planas separando os meios e incidência normal, conforme mostra a figura 2.16.

Figura 2.16. Reflexão e transmissão de ondas planas através de três meios.

Para simplificação do fenômeno de transmissão é assumido que a onda incidente é monocromática e unidimensional e o campo acústico totalmente desenvolvido sem nenhum efeito transiente. Assim, o coeficiente de transmissão em intensidade entre três meios é dado por (Kinsler, 1982):

$$T_I = \frac{4}{2 + \left[\left(\frac{Z_3}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_3} \right) \cos^2 k_2 L \right] + \left(\frac{Z_2^2}{Z_1 Z_3} + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2^2} \right) \sin^2 k_2 L} \quad (2.54)$$

onde L é a espessura do meio 2 e $k_2 = \omega/c_2$, em que c_2 é a velocidade de propagação longitudinal da onda no meio 2.

Para o caso em que o meio 1 seja igual ao meio 3, o coeficiente de transmissão em intensidade é dado por (Kinsler, 1982):

$$T_I = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{Z_2}{Z_1} - \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \sin^2 k_2 L} \quad (2.55)$$

Nesse caso, a transmissão é máxima ($T_I = 1$) quando $\sin k_2 L = 0$, em que $k_2 L = n\pi$ e $n = 0, 1, 2, \dots$. Logo, a espessura do meio II nesse caso é um múltiplo de n , ou seja, $L = \frac{\lambda_2 n}{2}$.

A figura 2.17 mostra o coeficiente de transmissão da onda transmitida através de uma parede plana (meio 2) de espessura 2 mm, imerso no meio 1, para os casos em que $Z_2/Z_1 = 0,5$ e $0,25$. Na obtenção dessas curvas não são considerados os efeitos de perdas que variam em função da frequência.

Figura 2.17. Amplitude de onda transmitida através de uma parede (meio 2) imersa num meio com impedância acústica diferente.

Considerando o caso em que a espessura do meio 2 é um número ímpar de um quarto do comprimento de onda, ou seja, $L = (2n-1)\frac{\lambda_2}{4}$, a equação 2.54 resulta em:

$$T_I = \frac{4Z_1Z_3}{\left(Z_2 + \frac{Z_1Z_3}{Z_2}\right)^2} \quad (2.56)$$

Essa equação é obtida a partir de $\cos k_2L = 0$ e $\sin k_2L = 1$. Nesse caso, para se obter a máxima transmissão, o valor da impedância no meio 2 deve ser igual a:

$$Z_2 = \sqrt{Z_1Z_3} \quad (2.57)$$

2.4.3. Efeitos da Atenuação no Coeficiente de Transmissão

A atenuação é a perda de energia que uma onda acústica sofre quando se propaga através de um fluido ou sólido. As perdas por atenuação podem ser de dois tipos: as perdas internas e as perdas na fronteira do meio de propagação. As perdas internas ocorrem no interior do meio de propagação e são do tipo viscosa, por

condução de calor ou por perdas associadas com trocas moleculares de energia. Tais perdas geralmente são maiores quando o meio de propagação possui volume grande. Outro tipo de perdas são aquelas que ocorrem na fronteira entre o meio de propagação e a vizinhança. Elas ocorrem com maior intensidade em meios de pequeno volume, como meios porosos, e podem ser devidos à reflexão, refração, difração e espalhamento da onda.

Na temperatura ambiente, muitos materiais monocristalinos têm atenuação acústica que aumenta com o quadrado da frequência. Os principais mecanismos que contribuem para este amortecimento viscoso são o mecanismo termoelástico e o mecanismo *Akhieser*. A atenuação termoelástica se dá devido à condução de calor irreversível a partir das regiões de compressão para as regiões de descompressão em uma onda longitudinal. Em temperaturas finitas, existe em todos os materiais uma distribuição de equilíbrio de ondas acústicas excitadas termicamente (chamadas fônons). A passagem de uma onda acústica, excitada coerentemente, perturba esse equilíbrio, resultando em um amortecimento ou absorção de energia. Esse mecanismo de amortecimento é conhecido como amortecimento *Akhieser*. O amortecimento pode também ocorrer em temperatura ambiente em materiais policristalinos que consistem em pequenos grãos de cristais únicos orientados aleatoriamente. Isso, contudo, nem sempre leva a um efeito viscoso e uma variedade ampla de curvas de atenuação é encontrada experimentalmente (Auld, 1973).

Nos sólidos as perdas na transmissão de ondas de ultrassom são menores do que nos meios líquidos e gasosos. Além disso, a atenuação nos sólidos é mais estável com a variação de temperatura. Para vários sólidos porosos, tais como membranas porosas de filtração, a variação da atenuação com a frequência pode ser descrita por uma relação em que a frequência é elevada a um expoente que varia de 0,4 a 4, dependendo do mecanismo que contribui para a atenuação. Portanto, quando um material tem atenuação alta e for utilizado como meio de acoplamento frontal em transdutores com emissão em ar, é necessário determinar tanto a atenuação na frequência do transdutor quanto a variação da atenuação com a frequência (Arenas, 2003).

Para que a atenuação seja considerada no coeficiente de transmissão das equações 2.53, 2.54 e 2.55, é necessário introduzir um número de onda complexo

$\tilde{k}_2 = k_2 + i\alpha$, sendo α o coeficiente de atenuação, e k_2 e α reais e positivos. Assim, o coeficiente de transmissão em intensidade, levando em consideração a atenuação, é representado da seguinte forma:

$$T_I = \frac{4}{2 + \left[\left(\frac{Z_3}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_3} \right) \cos^2(k_2 + i\alpha)L \right] + \left(\frac{Z_2^2}{Z_1 Z_3} + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2^2} \right) \sin^2(k_2 + i\alpha)L} \quad (2.58)$$

A figura 2.18 mostra o efeito da atenuação no coeficiente de transmissão em intensidade para uma onda transmitida através de uma parede plana. São considerados os dois casos da figura 2.17 e o coeficiente de atenuação varia com a raiz quadrada da frequência.

Figura 2.18. Efeito da atenuação no coeficiente de transmissão.

2.5. Fator de Acoplamento Eletromecânico Efetivo

O fator de acoplamento eletromecânico é definido em condições estáticas como a razão entre a energia convertida e a energia de excitação em um material piezelétrico. Em um material piezelétrico sem perdas, que funciona como um ressonador, existem as frequências de ressonância e antirressonância que são bem definidas e que coincidem, respectivamente com a admitância e a impedância

máxima. Em um material piezelétrico com perdas, existem três frequências próximas das frequências de impedância e condutância máximas. As três frequências associadas à frequência de ressonância correspondem à frequência considerando admitância absoluta máxima, condutância máxima e susceptância nula. As três frequências associadas à frequência de antirressonância correspondem à frequência considerando impedância absoluta máxima, resistência máxima e reatância nula. Segundo a norma *IEEE em piezeletricidade* (IEEE, 1987), o fator de acoplamento eletromecânico efetivo, de um material piezelétrico com perdas, é definido pela seguinte equação:

$$k_{ef} = \sqrt{\frac{f_{ar}^2 - f_r^2}{f_{ar}^2}} \quad (2.59)$$

em que f_r é definida como a frequência onde a condutância é máxima e f_{ar} é definida como a frequência onde a resistência é máxima.

A diferença relativa nas frequências de f_r e de f_{ar} depende do fator de acoplamento eletromecânico e da geometria do material piezelétrico. O fator de acoplamento eletromecânico efetivo é usado como um parâmetro conveniente de medida dessa diferença e é muito útil em aplicações práticas (Ferrante, 2002).

2.6. Largura de Banda

Um transdutor com maior largura de banda permite uma melhor resolução axial. A resolução axial é a capacidade do transdutor de distinguir duas regiões refletoras muito próximas que estão paralelas à superfície frontal do transdutor. Segundo a norma *ASTM E1065* (2008), a largura de banda corresponde a uma região delimitada que se encontra no interior do espectro de frequência. Os limites dessa região são determinados a um nível de -6 dB, medidos a partir do pico da resposta em frequência. A equação usada para o cálculo da largura de banda é:

$$BW = \frac{(f_s - f_i)}{f_c} \times 100 \quad (2.60)$$

onde, f_s é a frequência superior, f_i é a frequência inferior e f_c é a frequência central. A frequência central é a frequência calculada para estar no centro do limite da largura de banda. A largura de banda é expressa em porcentagem (Arnau, 2003).

Desilets *et al.* (1978) apresentaram um método para projetar transdutores de ultrassom com alta eficiência, de banda larga e com uma boa resposta impulsiva. Esse método é baseado no uso de camadas de acoplamento, de espessura de um quarto do comprimento de onda, que são fixadas entre o material piezelétrico e a carga acústica.

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização das Cerâmicas Piezelétricas Puras

A caracterização das propriedades das cerâmicas piezelétricas foi realizada com um programa implementado no software *MATLAB*, o qual está baseado no trabalho publicado pelos autores Nicolas *et al.* (2010), que consiste em ajustar, de forma iterativa, as curvas experimentais e teóricas da condutância e da resistência elétrica. As curvas experimentais foram obtidas no impedômetro elétrico e as teóricas simuladas no ANSYS. O programa é realizado através de três etapas principais que compreendem a análise de sensibilidade, a formulação de um algoritmo preliminar e a aplicação de um algoritmo de refinamento. Na análise de sensibilidade é possível observar a influência de cada propriedade da cerâmica sobre cada um dos modos de vibração. Com isto é determinado o coeficiente de sensibilidade que indica de forma quantitativa a influência de cada propriedade sobre cada um dos picos de ressonância. O algoritmo preliminar é construído a partir dos resultados da análise de sensibilidade e é usado para ajustar as propriedades de maior sensibilidade. O objetivo desse algoritmo é relacionar cada propriedade com uma ou mais características da curva de impedância. A primeira iteração desse algoritmo é executada com um conjunto inicial de propriedades, as quais podem ser obtidas a partir de dados fornecidos pelo fabricante ou de outra cerâmica piezelétrica com características similares. A seguinte equação é usada para determinar o valor de cada propriedade a partir da segunda iteração:

$$P_{n+1} = P_n + K \cdot S_p \cdot \xi_n \quad (3.1)$$

onde P_{n+1} é o valor do parâmetro P no passo $n+1$, K é um coeficiente empírico para gerar estabilidade no loop de cálculo ($K < 1$), S_p é o coeficiente de sensibilidade do parâmetro e ξ_n é a integral de erro. A estrutura do loop trabalha como um controlador de realimentação integral em que o erro ξ_n é tomado como a diferença entre as frequências simuladas e experimentais, e o coeficiente de sensibilidade S_p é usado como o ganho integral.

As propriedades modificadas obtidas como resultados da utilização do algoritmo preliminar são consideradas como sendo as propriedades iniciais no algoritmo de refinamento. O algoritmo de refinamento consiste em uma otimização baseada em um algoritmo de minimização simples. Geralmente a utilização do refinamento implica na determinação de uma função objetivo, para a escolha de quais propriedades serão ajustadas e na escolha da faixa de banda em frequência.

Uma cerâmica Pz27 e uma cerâmica APC850 foram caracterizadas utilizando o método descrito acima. A frequência de ressonância no modo de espessura dessas cerâmicas é de aproximadamente 1 MHz, correspondendo a uma espessura de 2,0 mm. Nesse caso, o diâmetro é de 20,00 mm para a cerâmica Pz27 e 25,01 mm para a cerâmica APC850. Primeiramente foram medidas as características geométricas, a densidade, a constante dielétrica e a impedância elétrica. As dimensões geométricas foram medidas com uma precisão de 0,01 mm para o diâmetro e 0,002 mm para a espessura, usando um paquímetro e um micrômetro, respectivamente. A densidade foi medida usando o princípio de Arquimedes com uma precisão de 25 kg/m³. Uma primeira aproximação para a constante dielétrica ϵ_{33}^S foi determinada experimentalmente de acordo com a norma *IEEE Standard on Piezoelectricity* (1996), medindo a capacitância em 2 MHz.

A medida da impedância elétrica foi realizada através de um analisador de impedâncias HP4194A. Foram adquiridos 1000 pontos igualmente espaçados na faixa de frequência de 11,5 kHz a 1,15 MHz a fim de ter a mesma discretização usada nas simulações com elementos finitos. A curva de impedância elétrica simulada foi obtida com simulação axissimétrica no software comercial ANSYS, usando elemento bidimensional PLANE13, com malha de 0,1 mm. Foi realizada análise harmônica sobre uma faixa de frequência de 60 kHz a 1,4 MHz.

O método simplex usado no refinamento foi o de Nelder-Mead disponível através da função `fminsearch` do software comercial MATLAB (*The Math Works, Natick, Ma*). A função objetivo a ser minimizada pelo algoritmo de refinamento é dada pela seguinte equação:

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^N [\log(G_i^{\text{exp}}) - \log(G_i^{\text{sim}})]^2 + [\log(R_i^{\text{exp}}) - \log(R_i^{\text{sim}})]^2}, \quad (3.2)$$

em que N é o número de pontos medidos na curva de impedância elétrica, G^{exp} é a condutância elétrica experimental, R^{exp} é a resistência elétrica experimental, e G^{sim} e R^{sim} são as mesmas magnitudes obtidas pelo método de elementos finitos.

3.2. Modelagem de piezocerâmicas puras retangulares usando o modelo de estado plano de deformação

Nesta seção são apresentadas as simulações realizadas usando o conceito de *estado plano de deformação*. Para isso são mostradas várias simulações de piezocerâmicas puras possuindo geometria retangular com diferentes profundidades. O objetivo é comparar o modelo de estado plano de deformação com a modelagem tridimensional, e verificar qual a influência da dimensão profundidade na aproximação dos resultados.

Foram simuladas cinco configurações de geometrias que são mostradas nas figuras de 4.5 a 4.14. A altura foi de 2 mm e a largura de 20 mm, enquanto a profundidade foi de 20, 30, 40, 80 e 160 mm. Cada amostra foi simulada no ANSYS usando o modelo de estado plano de deformação e a modelagem tridimensional. No modelo com o estado plano de deformação utilizou-se o elemento PLANE13 e no modelo tridimensional o elemento SOLID5. As curvas da condutância e susceptância elétrica foram obtidas para esses dois casos e o erro relativo foi calculado.

O erro relativo entre a curva de condutância obtida por modelagem tridimensional e o modelo de estado plano de deformação foi calculado usando a seguinte fórmula:

$$e_r = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [s_{3D}(i) - s_{2D}(i)]^2}}{m_t} \times 100 (\%) \quad (3.3)$$

em que $s_{3D}(i)$ e $s_{2D}(i)$ são os pontos contidos nas curvas obtidas com o modelo tridimensional e o modelo de estado plano de deformação, respectivamente. N é o número de pontos nas curvas e m_t é o valor máximo na curva de condutância tridimensional.

Na simulação com o modelo de estado plano de deformação, o valor da carga obtida após o processamento tem que ser multiplicado por um fator F_{at} que corresponde à profundidade da cerâmica. Assim, a relação entre a carga na cerâmica considerando simulação tridimensional e bidimensional é dada pela seguinte equação:

$$Q_{3D} = F_{at} \times Q_{2D} \quad (3.4)$$

3.3. Piezocompósitos retangulares com cortes gradados

Foram fabricados cinco tipos de piezocompósitos retangulares os quais são mostrados abaixo, no decorrer desta seção. Para melhor apresentação eles foram classificados como sendo do tipo 1, 2, 3, 4 e 2-2. Em cada piezocompósito a profundidade de corte é variada, conforme mostrado nas figuras. A fabricação dos piezocompósitos foi realizada a partir de uma cerâmica piezelétrica APC850 com frequência de ressonância no modo de espessura de 1 MHz. As dimensões das cerâmicas são de 20 mm x 2 mm x 13 mm. Para a obtenção dos cortes foi utilizada uma máquina de corte automática *Buehler*, com disco de corte de espessura de 0,06 mm da fabricante *Disc*, sendo a rotação do disco de 3000 rpm, com uma velocidade de avanço de 2mm/s. O material utilizado para preenchimento dos cortes foi a resina epóxi. Sobre a superfície superior e inferior de cada piezocompósito foi depositada uma camada de tinta de prata para criar os eletrodos. Em seguida, um fio em cada superfície foi fixado com o uso de uma resina epóxi condutiva, proveniente da fabricante *Chemtronics* - modelo *CW2400*.

As figuras 3.1, 3.2 e 3.3 mostram, respectivamente, o desenho tridimensional, a foto e o desenho esquemático da configuração dos cortes no piezocompósito do tipo 1.

Figura 3.1. Desenho tridimensional do piezocompósito com cortes gradados tipo 1.

Figura 3.2. Foto com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 1.

Figura 3.3. Desenho esquemático com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 1.

As figuras 3.4, 3.5 e 3.6 mostram, respectivamente, o desenho tridimensional, a foto e o desenho esquemático da configuração dos cortes no piezocompósito do tipo 2.

Figura 3.4. Desenho tridimensional do piezocompósito com cortes gradados tipo 2.

Figura 3.5. Foto com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 2

Figura 3.6. Desenho com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 2.

As figuras 3.7, 3.8 e 3.9 mostram, respectivamente, o desenho tridimensional, a foto e o desenho esquemático da configuração dos cortes no piezocompósito do tipo 3.

Figura 3.7. Desenho tridimensional do piezocompósito com cortes gradados tipo 3.

Figura 3.8. Foto com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 3.

Figura 3.9. Desenho com as dimensões dos cortes no piezocompósito do tipo 3.

As figuras 3.10, 3.11 e 3.12 mostram, respectivamente, o desenho tridimensional, a foto e o desenho esquemático da configuração dos cortes no piezocompósito gradado do tipo 4.

Figura 3.10. Desenho tridimensional do piezocompósito com cortes gradados tipo 4.

Figura 3.11. Foto com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 4.

Figura 3.12. Desenho com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 4.

As figuras 3.13, 3.14 e 3.15, mostram, respectivamente, o desenho tridimensional, a foto e o desenho esquemático da configuração dos cortes no piezocompósito do tipo 2-2.

Figura 3.13. Desenho tridimensional do piezocompósito 2-2.

Figura 3.14. Foto com as dimensões dos cortes no piezocompósito tipo 2-2

Figura 3.15. Desenho com as dimensões dos cortes no piezocompósito do tipo 2-2.

3.4. Piezocompósitos circulares

A seguir são apresentados os piezocompósitos circulares gradados e convencionais estudados neste trabalho. A fabricação dos piezocompósitos foi realizada a partir de cerâmicas piezelétricas Pz27 com frequência de ressonância no modo de espessura de 1 MHz. A geometria das cerâmicas é circular sendo os valores da espessura e do raio de 2 mm e 10 mm, respectivamente. Para a obtenção dos cortes foi utilizada uma máquina de corte semi-automática da fabricante *Buehler* - modelo Isomet 4000 (figura 3.16), com disco de corte de espessura de 0,15 mm da fabricante Buehler, sendo a rotação do disco de 3000 rpm, com uma velocidade de avanço de 2 mm/s. Uma foto dessa máquina é mostrada na figura 3.16. O material utilizado para preenchimento dos cortes foi a resina epóxi GY279/HY951. Sobre a superfície superior e inferior de cada piezocompósito foi depositada uma camada de tinta de prata para criar os eletrodos. Em seguida, um fio foi fixado em cada superfície com o uso de uma resina epóxi condutiva, da fabricante *Chemtronics* - modelo CW2400.

Figura 3.16. Máquina de corte semi-automática da fabricante Buehler – modelo Isomet 4000.

3.4.1. Piezocompósito circular com cortes em 1 direção

Foram construídos dois piezocompósitos com cortes em uma única direção. Num dos piezocompósitos os cortes foram do tipo 2-2 e no outro os cortes foram variados de uma profundidade de 2 mm até 0,25 mm com passos de 0,25 mm. A figura 3.17 mostra um quarto dos piezocompósitos construídos. Nas figuras 3.17(a) e 3.17(b) é mostrada a piezocerâmica com os cortes sem o preenchimento com o polímero. Nas figuras 3.17(c) e 3.17(d) o polímero é mostrado de forma esquemática e nas figuras 3.17(e) e 3.17(f) são mostrados os piezocompósitos após o preenchimento com o polímero.

Figura 3.17. Piezocompósitos com cortes em uma direção. (a), (c) e (e) referem-se a um piezocompósito tipo 2-2. (b), (d) e (f) referem-se a um piezocompósito com cortes gradados.

A figura 3.18 mostra a foto do piezocompósito construído com cortes gradados em uma direção.

Figura 3.18. Fotos do piezocompósito construído com cortes em uma direção (vista superior e vista lateral).

3.4.2. Piezocompósito circular gradado com cortes em duas direções com ângulo de 90° entre as direções de corte

Foram construídos dois piezocompósitos com cortes em duas direções, sendo que o ângulo entre as direções de corte foi de 90°. A figura 3.19 mostra um quarto desses piezocompósitos, os quais são um piezocompósito do tipo 1-3 (com todos os cortes passantes) e um piezocompósito com cortes de profundidades gradadas. A configuração da profundidade dos cortes para o piezocompósito gradado foi a mesma daquela utilizada para o piezocompósito gradado com cortes em uma direção descrito na seção 3.4.1. Primeiro são feitos cortes gradados em uma direção, sendo esta preenchida com epóxi. Em seguida, após a cura do epóxi, são realizados os mesmos cortes gradados em uma direção perpendicular a anterior, sendo esta também preenchida com epóxi. Após isto as duas superfícies foram metalizadas com tinta de prata e fios de eletrodos foram fixados com epóxi condutivo. As figuras 3.19(a) e 3.19(b) mostram, respectivamente, as piezocerâmicas com os cortes sem o preenchimento e com o polímero. As figuras

3.19(c) e 3.19(d) mostram somente os polímeros e as figuras 3.19(e) e 3.19(f) mostram os piezocompósitos preenchidos com polímero.

Figura 3.19. Piezocompósitos com cortes em duas direções. (a), (c) e (e) referem-se ao piezocompósito tipo 1-3 e (b), (d) e (f) referem-se ao piezocompósito gradado.

3.4.3. Piezocompósito circular gradado com cortes em duas direções com ângulo de 45° entre as direções de corte

Foram construídos dois piezocompósitos com cortes gradados semelhantes aos piezocompósitos apresentados na seção 3.4.2. A única diferença foi o ângulo entre as direções de corte, que agora é de 45° . A figura 3.20 mostra um quarto desses piezocompósitos, sendo um do tipo 1-3 e o outro com cortes gradados.

Figura 3.20. Piezocompósitos com ângulo de 45° entre as direções de cortes. (a), (c) e (e) referem-se ao piezocompósito do tipo 1-3 e (b), (d) e (f) referem-se ao piezocompósito com cortes gradados.

A figura 3.21 mostra a foto do piezocompósito construído com cortes gradados em duas direções com ângulo de 45° entre as direções de corte.

Figura 3.21. Foto do piezocompósito construído com cortes gradados em duas direções com ângulo de 45° entre as direções de corte (vista superior).

3.4.4. Piezocompósitos com variação da profundidade dos cortes

A seguir são apresentados outros piezocompósitos retangulares simulados no ANSYS com análise bidimensional usando o modelo de estado plano de deformação. As dimensões das cerâmicas são 20 mm x 20 mm x 2mm. A espessura do corte foi de 0,15 mm e o espaçamento entre os cortes foi de 0,5 mm.

As figuras 3.22 e 3.23 mostram as configurações dos cortes com um e dois planos de simetria, respectivamente. Os valores do ângulo de inclinação θ dos piezocompósitos com um e dois planos de simetria são mostrados, respectivamente, nas tabelas 3.1 e 3.2.

Figura 3.22. Parâmetros geométricos do piezocompósito com um plano de simetria (seção transversal)

Tabela 3.1. Valores do ângulo de inclinação dos cortes para o piezocompósito com um plano de simetria.

Piezocompósitos	Ângulo (°)
P1	1,0°
P2	1,5°
P3	2,0°
P4	2,5°
P5	3,0°
P6	3,5°
P7	4,5°
P8	5,0°
P9	5,5°
P10	6,5°
P11	7,0°
P12	8,0°
P13	9,5°
P14	10,5°

Figura 3.23. Parâmetros geométricos do piezocompósito com dois planos de simetria (seções transversal e longitudinal)

Tabela 3.2. Valores do ângulo de inclinação dos cortes para o piezocompósito com dois planos de simetria.

Piezocompósitos	Ângulo (°)
PS1	1,0°
PS2	2,0°
PS3	2,5°
PS4	3,0°
PS5	3,5°
PS6	4,5°
PS7	5,0°
PS8	5,5°
PS9	6,5°

3.4.5. Piezocompósitos sem variação da profundidade dos cortes

A seguir são apresentados os piezocompósitos simulados no ANSYS com análise no estado plano de deformação. A geometria do piezocompósito é retangular sendo que a profundidade de corte é mantida a mesma para todos os cortes. Foram simuladas 8 configurações de piezocompósitos com profundidades diferentes conforme mostrado na tabela 3.3. A espessura do corte foi de 0,15 mm e o espaçamento entre os cortes foi de 0,5 mm. A figura 3.24 mostra de forma esquemática os parâmetros geométricos do piezocompósito com profundidade dos cortes constantes. Essa geometria foi escolhida para entendimento da profundidade dos cortes na largura de banda.

Figura 3.24. Piezocompósito com profundidade de cortes constantes

Tabela 3.3. Valores da profundidade dos cortes para o piezocompósito com cortes de profundidade constantes

Piezocompósitos	Profundidade (h)
PP1	2,00 mm
PP2	1,75 mm
PP3	1,50 mm
PP4	1,25 mm
PP5	1,00 mm
PP6	0,75 mm
PP7	0,50 mm
PP8	0,25 mm

3.4.6. Estudo de convergência do modelo tridimensional no ANSYS

Antes de iniciar a simulação tridimensional dos vários tipos de piezocompósitos foi realizado um estudo de convergência dos dados para determinação do tamanho de elemento mínimo a ser utilizado. O tamanho dos elementos utilizados nas simulações tridimensional com elementos finitos foi de 0,2 mm. Para comprovação da convergência dos resultados ao se utilizar elementos menores que esse valor, usou-se uma malha com os elementos tendo tamanho de 0,1 mm. O teste de convergência foi realizado no piezocompósito circular com cortes gradados em duas direções, com ângulo de 90° entre as direções de corte, o qual é descrito na seção 4.4.2. Para o processamento utilizou-se um computador de mesa contendo 16 processadores *Intel Xenon CPU*. O modelo usando uma malha com elementos de tamanho de 0,1 mm resultou em 199900 elementos e 200000 nós com um tempo de processamento de 72 horas. O modelo usando uma malha com elementos de tamanho 0,2 mm resultou em 33088 elementos e 36703 nós com um tempo de processamento de 2,5 horas. Nos dois modelos de malha foi efetuada uma análise harmônica na faixa de 750 kHz a 950 kHz com passos de 7 kHz.

As figuras 3.25 e 3.26 mostram o modelo com malha de 0,1mm e 0,2mm, respectivamente.

Figura 3.25. Malha de um quarto de cerâmica com tamanho de elemento de 0.1 mm.

Figura 3.26. Malha de um quarto de cerâmica com tamanho de elemento de 0,2 mm.

As figuras 3.27 e 3.28 mostram as curvas da condutância e da susceptância para o modelo com tamanho de elementos de 0,1mm e 0,2 mm, respectivamente.

Figura 3.27. Curvas da condutância para a simulação com elementos de tamanho 0,1 mm e 0,2 mm.

Figura 3.28. Curvas da susceptância para a simulação com elementos de tamanho 0,1 mm e 0,2 mm.

Conforme mostram as curvas simuladas de condutância e susceptância, usando elementos de tamanho de 0,1 mm e 0,2 mm, verifica-se uma boa aproximação entre as duas curvas. Sendo assim, para a simulação tridimensional com elementos finitos, usando o software ANSYS, o tamanho do elemento empregado neste trabalho será de 0,2 mm.

3.5. Caracterização acústica de membranas porosas

Nesta seção serão apresentados a montagem e o procedimento experimental desenvolvidos para a caracterização acústica de três tipos de membranas porosas. Tais membranas são denominadas *mixed esters*, *nitrate cellulose* e *cellulose ester*, conforme a nomenclatura proposta pelos fabricantes. A tabela 3.4 mostra os dados medidos nas membranas caracterizadas.

Tabela 3.4. Dados medidos nas membranas caracterizadas.

Membrana	Tamanho dos poros (μm)	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Massa (g)	Densidade (g/cm^3)
Mixed esters ¹	0,45	0,13	47	0,107	0,0475
Nitrate cellulose ²	0,45	0,11	47	0,084	0,0440
Cellulose ester ²	0,22	0,12	47	0,099	0,0519

¹Whatman International, Ltd. Whatman House, <http://www.whatman.com>.

²Millipore, <http://www.millipore.com>.

Para a utilização das membranas porosas como camadas de acoplamento frontal (com espessura de um quarto de comprimento de onda) de transdutores ultrassônicos com emissão no ar é necessário o conhecimento de sua frequência de ressonância, impedância acústica e atenuação. Essas propriedades variam com o tipo do material, o tamanho e a morfologia dos poros e, geralmente, não são fornecidas pelos fabricantes. Elas podem ser obtidas quando a espessura, o volume, a massa, a velocidade de propagação longitudinal e o coeficiente de transmissão das membranas são conhecidos.

A velocidade de propagação longitudinal e o coeficiente de transmissão experimental foram obtidos utilizando um par de transdutores piezelétricos de ultrassom convencional da fabricante Deeper, com frequência central de 5 MHz e diâmetro de 6,5 mm. Essa frequência foi escolhida porque se visa visualizar o pico de ressonância na faixa de até 2 MHz, para que o pico de ressonância do transdutor não coincida com o pico de ressonância da membrana. A figura 3.29 mostra a montagem experimental para a caracterização das membranas.

Figura 3.29. Dispositivo para caracterização das membranas porosas. (a) montagem do dispositivo. (b) medição sem membrana. (c) medição com membrana.

Um desenho esquemático da montagem experimental é mostrado na figura 3.30. Conforme mostrado, na superfície frontal de cada transdutor (emissor e receptor) está acoplada uma camada de metacrilato de 10 mm de espessura cuja finalidade é evitar a sobreposição dos sinais ultrassônicos. Como acoplante, entre o transdutor e a camada de metacrilato, é utilizado um gel para transmissão ultrassônica, fornecido pela fabricante Parker Laboratórios (Aquasonic 100, referência 01-08).

Figura 3.30. Desenho esquemático da montagem experimental.

O sinal de excitação do transdutor emissor é um semi ciclo de pulso quadrado negativo sintonizado na frequência central dos transdutores (5MHz), o qual é mostrado na figura 3.31. Para a geração do pulso é utilizado um gerador de sinal da fabricante *Dasel*, modelo *Airscope*.

Figura 3.31. Sinal do pulso de excitação do transdutor emissor.

Para a determinação do coeficiente de transmissão em função da frequência, primeiro é obtido um sinal de referência, o qual é constituído por um sinal de

transmissão sem considerar a membrana porosa. A membrana porosa é substituída por uma fina camada de gel. Assim, o sinal ultrassônico percorre a distância formada pelas duas camadas de metacrilato e a fina camada de gel, sendo recebido pelo transdutor receptor que o converte em um sinal elétrico no domínio do tempo. A FFT do sinal é calculada usando o software comercial *MATLAB*. Após isto, a fina camada de gel é retirada e a membrana é colocada entre as duas camadas de metacrilato, e o mesmo procedimento para aquisição de sinal no domínio do tempo é realizado. A FFT do sinal também é calculada. A figura 3.32 mostra a configuração dos equipamentos para a aquisição dos sinais. Seja $A_{referência}$ a FFT do sinal de referência e $A_{amostra}$ a FFT do sinal com a amostra, o coeficiente de transmissão experimental (intensidade) é calculado por (Kelly e Hayward, 2004):

$$T_{ex} = \frac{(A_{amostra})^2}{(A_{referência})^2}$$

Figura 3.32. Configuração dos equipamentos para aquisição do sinal.

A velocidade de propagação longitudinal c_l da membrana foi obtida a partir da espessura t e da frequência f_r do primeiro pico de ressonância na curva do coeficiente de transmissão, usando a equação (Kelly e Hayward, 2004):

$$c_l = 2 \cdot f_r \cdot t \quad (3.5)$$

A espessura da membrana foi medida com um micrômetro e a massa com uma balança analítica de precisão.

O coeficiente de atenuação em cada membrana foi calculado supondo que a atenuação em função da frequência é dada segundo a expressão:

$$\alpha = \alpha_m \cdot f^n \quad (3.6)$$

em que o valor de n varia de acordo com o tipo de membrana, mostrado no próximo capítulo. O termo α_m é o coeficiente de atenuação experimental na membrana e é obtido através da seguinte equação:

$$\alpha_m = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (3.7)$$

em que α_1 é dado por (Kelly e Hayward, 2004):

$$\alpha_1 = \frac{\pi f_r}{c_l Q} \quad (3.8)$$

e α_2 é dado por (Kelly e Hayward, 2004):

$$\alpha_2 = \frac{\log R^2}{2l} \quad (3.9)$$

O termo α_1 é a atenuação devido às perdas no interior da membrana e o termo α_2 é a atenuação devido à reflexão nas interfaces que a membrana faz com o meio externo. O termo Q é o fator de qualidade,

O fator de qualidade é definido por:

$$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad (3.10)$$

em que f_2 e f_1 são as duas frequências acima e abaixo da frequência de ressonância f_r para as quais a potência média caiu a metade de seu valor em ressonância f_r (Kinsler, 1982).

3.6. Transdutores com Emissão em Ar

Nesta seção serão apresentadas a modelagem e a construção de dois transdutores com emissão em ar. Esses transdutores foram montados a partir dos piezocompósitos apresentados na seção 3.4.2, sendo que um foi montado a partir do piezocompósito 1-3 e o outro a partir do piezocompósito gradado com cortes em duas direções tendo um ângulo de 90° entre si. A frequência de ressonância do transdutor piezocompósito 1-3 é de 0,78 MHz e a do transdutor piezocompósito gradado é de 0,82 MHz.

Os transdutores são formados pelo piezocompósito e por duas camadas de acoplamento frontal. A primeira camada é de material epóxi e a segunda é de membrana porosa, como mostrado na figura 3.33. Ambas as camadas apresentam uma espessura de um quarto do comprimento de onda

Figura 3.33. Desenho esquemático do transdutor com emissão em ar.

A tabela 3.5 mostra a frequência de ressonância, a espessura da camada de epóxi e o tipo de membrana porosa usado em cada transdutor.

A sequência de montagem do transdutor compreende a fabricação do piezocompósito, a fixação dos eletrodos e a colagem das camadas de acoplamento frontal.

Tabela 3.5. Dados das membranas usadas no transdutor.

Tipo de Transdutor	Frequência de ressonância (MHz)	Espessura da camada de epóxi (/4)	Tipo de membrana
Piezocompósito 1-3	0,78	0,823 mm	Nitrate cellulose
gradado	0,82	0,865 mm	Nitrate cellulose

3.7. Caracterização por interferometria a laser

A interferometria a laser foi realizada através do vibrômetro Polytec PSV400 que mede o deslocamento e a variação do deslocamento com o tempo. O sistema de medida é constituído pelo controlador, a cabeça de escaneamento e a caixa de junção. O sinal do interferômetro é decodificado no controlador para decodificar o deslocamento e a velocidade. A cabeça de escaneamento consiste do interferômetro, dos espelhos do escâner para refletir o feixe do laser e uma câmara de vídeo para visualizar o objeto a ser medido. A caixa de junção permite a conexão central entre os componentes do sistema e as interfaces para acoplamento de aparelhos periféricos.

Para a aquisição do sinal, primeiro a amostra a ser analisada é posicionada e alinhada a uma distância de aproximadamente 1,5 m. O piezocompósito foi excitado com 3 ciclos de um sinal transiente senoidal de 100V. Então a região da amostra a ser escaneada é definida e o ajuste do foco é feito automaticamente. Logo após a definição dos parâmetros de aquisição se dá início ao escaneamento.

Para todas as amostras caracterizadas o sinal do deslocamento foi adquirido sem a utilização de filtro. Posteriormente foi utilizado um filtro digital usando o software comercial *MATLAB*.

As figuras 3.34 e 3.35 mostram, respectivamente, a montagem experimental do piezocompósito apoiado sobre o isopor e a cabeça de escaneamento do vibrômetro.

Figura 3.34. Montagem experimental do piezocompósito.

Figura 3.35. Cabeça de escaneamento do vibrômetro.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização das Cerâmicas Piezelétricas

As tabelas 4.1 e 4.2 mostram as propriedades para as piezocerâmicas Pz27 e APC850 após aplicação do algoritmo de refinamento (seção 3.1).

Tabela 4.1. Propriedades da piezocerâmica Pz27.

c_{11}^E (10^{10} N/m ²)	11,61
c_{12}^E (10^{10} N/m ²)	7,24
c_{13}^E (10^{10} N/m ²)	7,19
c_{33}^E (10^{10} N/m ²)	10,89
c_{44}^E (10^{10} N/m ²)	2,06
e_{31} (C/m ²)	-3,88
e_{33} (C/m ²)	10,45
e_{15} (C/m ²)	16,46
$\varepsilon_{11}^S / \varepsilon_0$	742,03
$\varepsilon_{33}^S / \varepsilon_0$	850
ρ (kg/m ³)	7700

Tabela 4.2. Propriedades da piezocerâmica APC850.

c_{11}^E (10^{10} N/m ²)	13,09
c_{12}^E (10^{10} N/m ²)	78,72
c_{13}^E (10^{10} N/m ²)	8,27
c_{33}^E (10^{10} N/m ²)	11,63
c_{44}^E (10^{10} N/m ²)	2,03
e_{31} (C/m ²)	-3,05
e_{33} (C/m ²)	15,84
e_{15} (C/m ²)	12,70
$\varepsilon_{11}^S / \varepsilon_0$	1051
$\varepsilon_{33}^S / \varepsilon_0$	753
ρ (kg/m ³)	7535

As figuras 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, o módulo e a fase da impedância elétrica da cerâmica Pz27. As figuras 4.3 e 4.4 mostram esses mesmos dados para a cerâmica APC850. Todas essas figuras apresentam as curvas teóricas e experimentais sobrepostas, o que facilita a visualização da concordância entre as mesmas. Tais resultados mostram que as propriedades determinadas estão muito próximas dos valores reais. Essas propriedades são utilizadas nas simulações dos piezocompósitos nas próximas seções.

Figura 4.1. Comparação entre as curvas experimental e simulada do módulo da impedância elétrica para a cerâmica Pz27.

Figura 4.2. Comparação entre as curvas experimental e simulada da fase da impedância elétrica para a cerâmica Pz27.

Figura 4.3. Comparação entre as curvas experimental e simulada do módulo da impedância elétrica para a cerâmica APC850.

Figura 4.4. Comparação entre as curvas experimental e simulada da fase da impedância elétrica para a cerâmica APC850.

4.2. Piezocerâmicas Puras Retangulares

A tabela 4.3 mostra a profundidade das cinco amostras com os respectivos valores do fator F_{at} e do erro relativo e_r .

Tabela 4.3. Variação do fator do erro relativo e_r com a dimensão profundidade

Profundidade P(mm)	Fator (F_{at})	Erro relativo (e_r)
20	0,020	13,0
30	0,030	6,4
40	0,040	5,3
80	0,080	5,1
160	0,160	5,0

Conforme mostrado na tabela 4.3, com o aumento da profundidade P o erro relativo tende a convergir para o valor de 5,0. É também observado que quando a profundidade é maior que o dobro da largura (20mm) o erro relativo tende a se manter em 5,0%. Esse resultado é considerado bom, porque permite utilizar a modelagem bidimensional com o estado plano de deformação para simular piezocompósitos retangulares com cortes gradados.

As figuras de 4.5 a 4.14 mostram as curvas da condutância e susceptância utilizando os modelos tridimensionais e de estado plano de deformação para as cinco geometrias simuladas (seção 3.2).

Figura 4.5. Comparação entre a condutância obtida por simulação tridimensional e a condutância considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 20 mm.

Figura 4.6. Comparação entre a susceptância obtida por simulação tridimensional e a susceptância obtida considerando o modelo de estado plano de deformação para a profundidade de 20 mm.

Figura 4.7. Comparação entre a condutância obtida por simulação tridimensional e a condutância considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 30 mm.

Figura 4.8. Comparação entre a susceptância obtida por simulação tridimensional e a susceptância obtida considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 30 mm.

Figura 4.9. Comparação entre a condutância obtida por simulação tridimensional e a condutância considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 40 mm.

Figura 4.10. Comparação entre a susceptância obtida por simulação tridimensional e a susceptância obtida considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 40 mm.

Figura 4.11. Comparação entre a condutância obtida por simulação tridimensional e a condutância considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 80 mm.

Figura 4.12. Comparação entre a susceptância obtida por simulação tridimensional e a susceptância obtida considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 80 mm.

Figura 4.13. Comparação entre a condutância obtida por simulação tridimensional e a condutância considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 160 mm.

Figura 4.14. Comparação entre a susceptância obtida por simulação tridimensional e a susceptância obtida considerando o modelo de estado plano de deformação para a amostra com profundidade de 160 mm.

Pela análise das curvas de susceptância, para a profundidade de 160 mm é obtida a melhor convergência entre os resultados da simulação tridimensional e os resultados da simulação bidimensional usando a deformação plana. O erro relativo entre as duas curvas é de 5%.

4.3. Caracterização elétrica e por interferometria a laser dos Piezocompósitos

Nesta seção são apresentados os resultados da caracterização elétrica e por interferometria a laser dos piezocompósitos retangulares gradados com cortes em uma direção e do piezocompósito 2-2. São mostradas as curvas de condutância e susceptância experimentais, as quais são comparadas com as obtidas por simulação tridimensional por elementos finitos com o software ANSYS. A simulação bidimensional não foi realizada devido à profundidade (13 mm) dos piezocompósitos ser menor que a largura (20 mm).

Também são mostrados os resultados para os deslocamentos observados na superfície dos piezocompósitos para faixas de frequências de 600 kHz a 1200 kHz com um intervalo de 100 kHz. Para a seleção dessas faixas de frequência foram

utilizados filtros digitais passa banda usando o software MATLAB. Para a obtenção da curva experimental usou-se o analisador de impedância HP4194A. Na simulação tridimensional foram utilizados os elementos SOLID45 para o material piezelétrico e o SOLID5 para o material polimérico. O tamanho dos elementos foi de 0,2 mm.

4.3.1 Piezocompósitos Retangulares com Cortes Gradados do tipo 1

As figuras 4.15 e 4.16 mostram, respectivamente, as curvas experimentais e simuladas da condutância e da susceptância para o piezocompósito tipo 1.

Figura 4.15. Curva da condutância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.

Figura 4.16. Curva da susceptância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.

A partir da curva de condutância, foi verificado que o piezocompósito do tipo 1 apresentou uma largura de banda de 10% e fator de acoplamento eletromecânico efetivo de 0,41.

As figuras 4.17 a 4.22 mostram os deslocamentos máximos perpendiculares à superfície do piezocompósito retangular do tipo 1 quando aplicado um filtro passa banda para as várias faixas de frequências com largura de 100 kHz.

Figura 4.17. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 600 a 700 kHz para o piezocompósito com cortes gradados

Após a aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 600 kHz e 700 kHz, verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito (figura 4.17). Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,04 nm, desconsiderando os deslocamentos nas bordas devido à vibração que não resulta do modo de espessura.

Figura 4.18. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 701 a 800 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.

Após a aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 701 kHz e 800 kHz, os deslocamentos máximos continuam distribuídos na superfície do

piezocompósito (figura 4.18) com valores de aproximadamente 0,02 nm. A região marcada com um círculo em vermelho apresenta um deslocamento maior que nas outras regiões do piezocompósito, porém esse deslocamento não é considerado nos estudos de deslocamento em função da frequência, pois corresponde ao local onde fica a solda dos fios eletrodos.

Figura 4.19. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 801 a 900 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.

Com o filtro digital passa banda entre as frequências de 801 kHz e 900 kHz, os deslocamentos máximos estão distribuídos nas extremidades do piezocompósito, na região onde estão localizados os cortes de maior profundidade (figura 4.19). Os valores desses deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,08 nm, desconsiderando o local da solda do fio eletrodo.

Figura 4.20. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.

Com o filtro digital passa banda entre as frequências de 901 kHz e 1000 kHz, os deslocamentos máximos ficaram distribuídos no centro do piezocompósito, na região onde se encontram os cortes de menor profundidade (figura 4.20). Os valores desses deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,15 nm.

Figura 4.21. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.

Após a aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 1001 kHz e 1100 kHz, verifica-se que os deslocamentos máximos estão concentrados no centro do piezocompósito, mais precisamente no centro da região onde estão localizados os cortes de menor profundidade (figura 4.21). Os valores desses deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,25 nm. Nessa faixa de frequência, encontra-se a frequência central do piezocompósito que é de 1010 kHz, resultando nos maiores deslocamentos do piezocompósito tipo 1.

Figura 4.22. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1.

Agora aplicando o filtro digital passa banda entre as frequências de 1101 kHz e 1200 kHz, os deslocamentos máximos ficaram distribuídos em duas regiões separadas, dentro da região com os cortes de menor profundidade, como mostra a figura 4.22. Os valores desses deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,08 nm.

Na figura 4.23 são mostrados os deslocamentos experimentais medidos quando o piezocompósito é excitado com a frequência central de 1010 kHz e na figura 4.24, os deslocamentos teóricos calculados no ANSYS com mesma frequência de excitação de 1010 kHz. Os resultados teóricos são mostrados apenas para um quarto do piezocompósito, o que é suficiente por haver dois planos de simetria. Foram incluídas setas contínuas e tracejadas nos gráficos de forma a tornar clara a posição do piezocompósito analisado no ANSYS. É possível notar que os

deslocamentos máximos experimentais e teóricos se encontram na região central do piezocompósito.

Figura 4.23. Deslocamentos máximos experimentais para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1, quando excitado com a frequência central de 1010 kHz.

Figura 4.24. Deslocamentos máximos teóricos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 1, quando excitado com a frequência central de 1010 kHz.

4.3.2 Piezocompósitos Retangulares com Cortes Gradados do Tipo 2

As figuras 4.25 e 4.26 mostram, respectivamente, as curvas experimentais e simuladas da condutância e da susceptância para o piezocompósitos tipo 2.

Figura 4.25. Curva da condutância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.

Figura 4.26. Curva da susceptância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.

A partir da curva de condutância foi verificado que o piezocompósito do tipo 2 apresentou uma largura de banda de 7% e fator de acoplamento eletromecânico efetivo de 0,57.

As figuras de 4.27 a 4.32 mostram os deslocamentos máximos perpendiculares à superfície do piezocompósito retangular do tipo 2 quando aplicado um filtro passa banda para as várias faixas de frequências indicadas nas figuras.

Figura 4.27. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 600 a 700 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.

Após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 600 kHz e 700 kHz, verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,06 nm, desconsiderando os deslocamentos na região onde fica a solda dos fios eletrodos (região marcada com um círculo em vermelho) e nas bordas.

Figura 4.28. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 701 kHz a 800 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.

Para o piezocompósito do tipo 2, após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 701 kHz e 800 kHz, verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos nas regiões onde estão localizados os cortes de maior profundidade (figura 4.28). Os valores desses deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,25 nm.

Figura 4.29. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 801 a 900 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.

Para o piezocompósito do tipo 2, após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 801 kHz e 900 kHz, verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos nas regiões onde estão localizados os cortes de maior profundidade (figura 4.29). Os valores desses deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,30 nm..

Figura 4.30. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 901 kHz a 1000 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.

Para o piezocompósito do tipo 2, após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 901 kHz e 1000 kHz, verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos nas regiões onde estão localizados os cortes de maior profundidade. Os valores desses deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,25 nm.

Figura 4.31. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1001 kHz a 1100 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.

Para o piezocompósito do tipo 2 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 1001 kHz e 1100 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na região central do piezocompósito, na região onde estão localizados os cortes de menor profundidade. Os valores desses deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,14 nm.

Figura 4.32. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1101 kHz a 1200 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2.

Para o piezocompósito do tipo 2, após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 1101 kHz e 1200 kHz, verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito (figura 4.32). Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,03 nm. Para essa faixa de frequência, observa-se claramente a presença da solda dos fios eletrodos na região marcada com um círculo em vermelho, cujos deslocamentos foram de até aproximadamente 0,08 nm.

Na figura 4.33 são mostrados os deslocamentos experimentais medidos quando o piezocompósito é excitado com a frequência central de 928 kHz e na figura 4.34, os deslocamentos teóricos calculados no ANSYS com a mesma frequência de excitação de 928 kHz. Os resultados teóricos são mostrados apenas para metade do piezocompósito, considerou-se somente o plano de simetria na direção dos cortes. Foram incluídas setas contínuas e tracejadas nos gráficos de forma a tornar clara a posição do piezocompósito analisado no ANSYS.

Figura 4.33. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2 quando excitado com a frequência central de 928 kHz.

Figura 4.34. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2 quando excitado com a frequência central de 928 kHz.

4.3.3 Piezocompósitos Retangulares com Cortes Gradados do Tipo 3

As figuras 4.35 e 4.36 mostram, respectivamente, as curvas experimentais e simuladas da condutância e da susceptância para o piezocompósitos tipo 3.

Figura 4.35. Curva da condutância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.

Figura 4.36. Curva da susceptância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.

A partir da curva de condutância, foi verificado que o piezocompósito do tipo 3 apresentou uma largura de banda de 13% e fator de acoplamento eletromecânico efetivo de 0,49.

As figuras de 4.37 a 4.42 mostram os deslocamentos máximos perpendiculares à superfície do piezocompósito retangular do tipo 3 quando aplicado um filtro passa banda para as várias faixas de frequências indicadas nas figuras.

Figura 4.37. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 600 a 700 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.

Para o piezocompósito do tipo 3 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 600 kHz e 700 kHz, verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito, embora tais deslocamentos não sejam homogêneos (figura 4.37). Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,15 nm, desconsiderando os deslocamentos máximos nas bordas.

Figura 4.38. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 701 a 800 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.

Para o piezocompósito do tipo 3, após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 701 kHz e 800 kHz, verifica-se que os deslocamentos máximos estão localizados nas regiões onde estão localizados os cortes com maior profundidade. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,25 nm.

Figura 4.39. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 801 a 900 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.

Para o piezocompósito do tipo 3 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 801 kHz e 900 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão localizados nas regiões onde estão localizados os cortes com maior profundidade. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,25 nm.

Figura 4.40. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.

Para o piezocompósito do tipo 3 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 901 kHz e 1000 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão concentrados nas regiões onde estão localizados os cortes com maior profundidade. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,12 nm.

Figura 4.41. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.

Para o piezocompósito do tipo 3 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 1001 kHz e 1100 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos em toda a superfície do piezocompósito. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,03 nm. A região marcada com um círculo em vermelho apresenta um deslocamento maior, porém este deslocamento não deve ser levado em consideração nos estudos de deslocamento em função da frequência pois eles correspondem a região onde fica a solda dos fios eletrodos.

Figura 4.42. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3.

Para o piezocompósito do tipo 3 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 1101 kHz e 1200 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos em toda a superfície do piezocompósito. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,025 nm. A região marcada com um círculo em vermelho apresenta um deslocamento maior, porém este deslocamento não deve ser levado em consideração nos estudos de deslocamento em função da frequência pois eles correspondem a região onde fica a solda dos fios eletrodos.

Na figura 4.43 são mostrados os deslocamentos experimentais medidos quando o piezocompósito é excitado com a frequência central de 940 kHz e na figura 4.44, os deslocamentos teóricos calculados no ANSYS com mesma frequência de excitação de 940 kHz. Os resultados teóricos são mostrados apenas para um quarto do piezocompósito, pois foi considerado dois planos de simetria.

Foram incluídas setas contínuas e tracejadas nos gráficos de forma a tornar clara a posição do piezocompósito analisado no ANSYS.

Figura 4.43. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3 quando excitado com a frequência central de 940 kHz.

Figura 4.44. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 3 quando excitado com a frequência central de 940 kHz.

4.3.4. Piezocompósitos Retangulares com Cortes Gradados do Tipo 4

As figuras 4.45 e 4.46 mostram, respectivamente, as curvas experimentais e simuladas da condutância e da susceptância para o piezocompósitos tipo 4.

Figura 4.45. Curva da condutância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.

Figura 4.46. Curva da susceptância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.

A partir da curva de condutância foi verificado que o piezocompósito do tipo 4 apresentou uma largura de banda de 11% e fator de acoplamento eletromecânico efetivo de 0,46.

As figuras de 4.47 a 4.52 mostram os deslocamentos máximos perpendiculares à superfície do piezocompósito retangular do tipo 4 quando aplicado um filtro passa banda para as várias faixas de frequências indicadas nas figuras.

Figura 4.47. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 600 a 700 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.

Após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 600 kHz e 700 kHz (figura 4.47), verifica-se que os deslocamentos distribuídos em toda a superfície do piezocompósito são pequenos com valores máximos de aproximadamente 0,03 nm, desconsiderando alguns valores maiores devido à proximidade com a borda.

Figura 4.48. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 701 e 800 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.

Com o filtro digital passa banda entre as frequências de 701 kHz e 800 kHz, os deslocamentos são pequenos e distribuídos em toda a região do piezocompósito com valores máximos de aproximadamente 0,07 nm (figura 4.48).

Figura 4.49. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 801 a 900 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.

Para o piezocompósito do tipo 4, após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 801 kHz e 900 kHz, os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,08 nm.

Figura 4.50. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.

Para o piezocompósito do tipo 4 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 901 kHz e 1000 kHz verifica-se que os deslocamentos

máximos estão localizados nas extremidades do piezocompósito, nas regiões onde as profundidades de corte são maiores. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,14 nm.

Figura 4.51. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.

Para o piezocompósito do tipo 4 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 1001 kHz e 1100 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos em toda a superfície do piezocompósito, exceto nas extremidades nas regiões onde as profundidades de corte são maiores. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,09 nm.

Figura 4.52. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4.

Para o piezocompósito do tipo 4 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 1101 kHz e 1200 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito, exceto nas extremidades onde as profundidades de corte são maiores. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,04 nm.

Na figura 4.53 são mostrados os deslocamentos experimentais medidos quando o piezocompósito é excitado com a frequência central de 1010 kHz e na figura 4.54, os deslocamentos teóricos calculados no ANSYS com mesma frequência de excitação de 1010 kHz. Os resultados teóricos são mostrados apenas para um quarto do piezocompósito, pois foi considerado dois planos de simetria. Foram incluídas setas contínuas e tracejadas nos gráficos de forma a tornar clara a posição do piezocompósito analisado no ANSYS. Observa-se que os deslocamentos máximos tanto teóricos quanto experimentais ocorrem nas extremidades onde as profundidades de corte são maiores.

Figura 4.53. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4 quando excitado com a frequência central de 1010 kHz.

Figura 4.54. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 4 quando excitado com a frequência central de 1010 kHz.

4.3.5 Piezocompósitos Retangulares com Cortes Gradados do Tipo 2-2

As figuras 4.55 e 4.56 mostram, respectivamente, as curvas experimentais e simuladas da condutância e da susceptância para o piezocompósitos tipo 2-2.

Figura 4.55. Curva da condutância experimental e por simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.

Figura 4.56. Curva da susceptância experimental e da simulação 3D para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.

A partir da curva de condutância do piezocompósito do tipo 2-2, foram determinados a largura de banda de 9% e o fator de acoplamento eletromecânico efetivo de 0,54.

As figuras de 4.57 a 4.62 mostram os deslocamentos máximos perpendiculares à superfície do piezocompósito 2-2, quando aplicado um filtro passa banda para as várias faixas de frequências indicadas nas figuras.

Figura 4.57. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 600 a 700 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.

Para o piezocompósito do tipo 2-2 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 600 kHz e 700 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,15 nm.

Figura 4.58. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 701 a 800 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.

Para o piezocompósito do tipo 2-2 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 701 kHz e 800 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,30 nm. É possível observar que esses deslocamentos estão divididos em 4 regiões que provavelmente estão relacionadas ao modo de vibração. A região marcada com um círculo em vermelho apresenta um deslocamento maior, porém este deslocamento não deve ser levado em consideração nos estudos de deslocamento em função da frequência pois eles correspondem a região onde fica a solda dos fios eletrodos.

Figura 4.59. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 801 a 900 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.

Para o piezocompósito do tipo 2-2 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 801 kHz e 900 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,4 nm. É possível observar que esses deslocamentos estão divididos em 5 regiões que provavelmente estão relacionadas ao modo de vibração. A região marcada com um círculo em vermelho apresenta um deslocamento maior, porém este deslocamento não deve ser levado em consideração nos estudos de deslocamento em função da frequência pois eles correspondem a região onde fica a solda dos fios eletrodos.

Figura 4.60. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.

Para o piezocompósito do tipo 2-2 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 901 kHz e 1000 kHz verifica-se que os deslocamentos

máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,06 nm. A região marcada com um círculo em vermelho apresenta um deslocamento maior, porém este deslocamento não deve ser levado em consideração nos estudos de deslocamento em função da frequência pois eles correspondem a região onde fica a solda dos fios eletrodos.

Figura 4.61. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.

Para o piezocompósito do tipo 2-2 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 1001 kHz e 1100 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,03 nm. A região marcada com um círculo em vermelho apresenta um deslocamento maior, porém este deslocamento não deve ser levado em consideração nos estudos de deslocamento em função da frequência pois eles correspondem a região onde fica a solda dos fios eletrodos.

Figura 4.62. Deslocamentos máximos experimentais na faixa de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2.

Para o piezocompósito do tipo 2-2 após aplicação do filtro digital passa banda entre as frequências de 1101 kHz e 1200 kHz verifica-se que os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície do piezocompósito. Os valores dos deslocamentos máximos são de aproximadamente 0,02 nm. A região marcada com um círculo em vermelho apresenta um deslocamento maior, porém este deslocamento não deve ser levado em consideração nos estudos de deslocamento em função da frequência pois eles correspondem a região onde fica a solda dos fios eletrodos.

Na figura 4.63 são mostrados os deslocamentos experimentais medidos quando o piezocompósito do tipo 2-2 é excitado com a frequência central de 815 kHz e na figura 4.64, os deslocamentos teóricos calculados no ANSYS com a mesma frequência de excitação de 817 kHz. Os resultados teóricos são mostrados apenas para um quarto do piezocompósito, pois nessa simulação foram considerados dois planos de simetria. Foram incluídas setas contínuas e tracejadas nos gráficos de forma a tornar clara a posição do piezocompósito analisado no ANSYS.

Figura 4.63. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2 quando excitado com a frequência central de 815 kHz.

Figura 4.64. Deslocamentos máximos para o piezocompósito com cortes gradados tipo 2-2 quando excitado com a frequência central de 817 kHz.

A tabela 4.4 mostra os valores experimentais da largura de banda e do fator de acoplamento eletromecânico efetivo para os piezocompósitos do tipo 1, 2, 3, 4 e 2-2.

Tabela 4.4. Largura de banda e fator de acoplamento eletromecânico efetivo para os vários tipos de piezocompósitos com cortes gradados e do tipo 2-2

Tipo de Piezocompósito	Largura de Banda (%)	Fator de Acoplamento Eletromecânico Efetivo
1	10	0,41
2	7	0,57
3	13	0,49
4	11	0,46
2-2	9	0,54

O piezocompósito do tipo 3 apresentou maior largura de banda e o piezocompósito do tipo 2 apresentou maior fator de acoplamento eletromecânico efetivo. A maior largura de banda do piezocompósito do tipo 3 pode estar relacionada ao fenômeno que ocorre em piezocompósitos multifrequências (*Sanchez et al*, 1999; *Lamberti et al*, 2000). Os piezocompósitos multifrequências permite a excitação em várias frequências. Isso se deve principalmente aos deslocamentos não homogêneos que ocorrem na superfície durante a excitação. Conforme mostrado por Smith e Auld (1991) no artigo clássico sobre modelagem de piezocompósito 1-3, sabe-se que para o piezocompósito 1-3 a máxima deformação ocorre quando se excita no modo de espessura. Os deslocamentos máximos na superfície do piezocompósito gradado apresentam-se em determinadas regiões. Tais deslocamentos máximos nessas regiões dependem da frequência de excitação. Por isso pode-se considerar os piezocompósitos gradados deste trabalho como sendo piezocompósitos multifrequências.

4.4. Piezocompósitos Circulares

Abaixo são mostrados os resultados da caracterização no analisador de impedância e por interferometria a laser para o piezocompósito 1-3, piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte e piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte. Na caracterização elétrica são mostradas as curvas de condutância e susceptância elétricas experimentais e as obtidas por simulação tridimensional usando o método dos elementos finitos. Para o

piezocompósito gradado com cortes em uma direção foram determinadas somente as impedâncias elétricas teóricas e experimentais.

Para todos os piezocompósitos os dados de impedância elétrica foram obtidos no analisador de impedâncias HP4194A. A faixa de análise foi de 600 kHz a 1200 kHz. Na modelagem tridimensional o elemento usado para o polímero foi o SOLID45 e o elemento usado para o material piezocerâmico foi o elemento SOLID5. O tamanho de cada elemento na malha foi de 0,2 mm.

4.4.1. Piezocompósito Gradado com Cortes em 1 Direção

As figuras 4.65 e 4.66 mostram as curvas experimentais e teóricas da condutância e susceptância elétrica para o piezocompósito gradado com cortes em uma única direção.

Figura 4.65. Curva da condutância elétrica em função da frequência para o piezocompósito gradado com cortes em uma direção.

Figura 4.66. Curva da susceptância elétrica em função da frequência para o piezocompósitos com cortes em uma direção.

A partir da curva de condutância foi verificado que o piezocompósito gradado com cortes em uma direção apresentou uma largura de banda de 23% e fator de acoplamento eletromecânico efetivo de 0,59.

4.4.2. Piezocompósito Gradado com Ângulo de 45° entre as Direções de Corte

As figuras 4.67 e 4.68 mostram as curvas experimentais e teóricas de condutância e susceptância elétrica em função da frequência para o piezocompósito com cortes gradados em duas direções com um ângulo de 45°.

Figura 4.67. Curva da condutância elétrica em função da frequência para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.

Figura 4.68. Curva da susceptância elétrica em função da frequência para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.

A partir da curva de condutância do piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de cortes, determinaram-se a largura de banda de 22% e o fator de acoplamento eletromecânico efetivo de 0,64.

As figuras de 4.69 a 4.74 mostram os deslocamentos máximos perpendiculares à superfície do piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de cortes, quando aplicado um filtro passa banda para as várias faixas de frequências indicadas nas figuras. Observa-se que na largura de banda do

piezocompósito, variando de 700 a 1000 kHz, com faixas de 100kHz, existem três regiões bem definidas de máximos deslocamentos. Essas regiões são formadas por um anel externo para a faixa de 701 a 800 kHz (figura 4.70), um anel interno intermediário para a faixa de 801 a 900 kHz (figura 4.71) e um círculo central para faixa de 901 a 1000 kHz (figura 4.72), apresentando deslocamentos máximos de aproximadamente 0,08 nm. Para a faixa inicial de 600 a 700 kHz (figura 4.69), os deslocamentos máximos estão distribuídos na superfície da borda do piezocompósito com valores máximos de aproximadamente 0,15 nm. Para as faixas de 1001 a 1100 kHz (figura 4.74) e 1101 a 1200 kHz (figura 4.75), os deslocamentos estão distribuídos uniformemente em toda a superfície do piezocompósito com valores máximos de aproximadamente 0,02nm.

Figura 4.69. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 600 a 700 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.

Figura 4.70. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 701 a 800 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.

Figura 4.71. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 801 a 900 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.

Figura 4.72. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.

Figura 4.73. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.

Figura 4.74. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte.

Na figura 4.75 são mostrados os deslocamentos experimentais medidos com uma excitação de 760 kHz e na figura 4.76, os deslocamentos teóricos calculados no ANSYS com frequência de excitação de 765 kHz. Os resultados teóricos são mostrados apenas para um quarto do piezocompósito, o que é suficiente por haver dois planos de simetria.

Figura 4.75. Deslocamentos máximos experimentais para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte, quando excitado a 760 kHz

Figura 4.76. Deslocamentos máximos teóricos para o piezocompósito gradado com ângulo de 45° entre as direções de corte, quando excitado a 765 kHz.

Conforme mostrado nas figuras 4.75 e 4.76, os deslocamentos são máximos nas bordas e mínimo na região do centro.

4.4.3. Piezocompósito Gradado com Ângulo de 90° entre as Direções de Corte

As figuras 4.77 e 4.78 mostram as curvas experimentais e teóricas da condutância e susceptância elétrica para o piezocompósito com cortes gradados em duas direções com um ângulo de 90° entre elas.

Figura 4.77. Curva da condutância elétrica em função da frequência para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte

Figura 4.78. Curva da susceptância elétrica em função da frequência para o piezocompósito com cortes em duas direções com ângulo de 90° entre os cortes.

A partir da curva de condutância do piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de cortes, a largura de banda de 15% e o fator de acoplamento eletromecânico efetivo de 0,59 foram determinados.

As figuras de 4.79 a 4.84 mostram os deslocamentos máximos perpendiculares à superfície do piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de cortes, aplicando um filtro passa banda em faixas de frequências variando de 100 em 100 kHz. Para a faixa de frequência inicial de 600 a 700 kHz (figura 4.79), as amplitudes dos deslocamentos em toda a superfície do piezocompósito são pequenas, da ordem de 0,1 nm, não havendo contribuição devido à ressonância no modo de espessura. Nessa figura e nas figuras seguintes, desconsideraram-se os deslocamentos medidos na região marcada com um círculo em vermelho, pois é o local onde fica a solda dos fios eletrodos. Para as faixas de frequências entre 701 a 800 kHz (figura 4.80), 801 e 900 kHz (figura 4.81) e 901 a 1000 kHz (figura 4.82), são obtidas as amplitudes máximas de deslocamentos de aproximadamente 0,5, 0,4 e 0,1 nm, respectivamente. Esses valores máximos de deslocamentos aparecem em regiões distintas na superfície piezocompósito para cada uma das faixas de frequência contida na largura de banda. Para as faixas de frequências entre 1001 kHz e 1100 kHz e entre 1101 e 1200 kHz, verifica-se que os

deslocamentos são pequenos estão distribuídos uniformemente em toda a superfície do piezocompósito com valores máximos de aproximadamente 0,04 e 0,02 nm.

Figura 4.79. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 600 a 700 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.

Figura 4.80. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 701 a 800 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.

Figura 4.81. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 801 a 900 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.

Figura 4.82. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.

Figura 4.83. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.

Figura 4.84. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1101 a 1200 kHz para o piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.

Na figura 4.85 são mostrados os deslocamentos experimentais medidos quando o piezocompósito é excitado com a frequência central de 820 kHz e na figura 4.86 são mostrados os deslocamentos teóricos calculados no ANSYS com a

frequência de excitação de 786 kHz. Os resultados teóricos são mostrados apenas para um quarto da área superficial do piezocompósito, devido aos dois planos de simetria considerados na simulação. Os círculos em vermelho representados nessas duas figuras mostram as regiões comparadas.

Figura 4.85. Deslocamento experimental na direção de espessura medido a 820 kHz.

Figura 4.86. Deslocamento teórico na direção de espessura medido a 786 kHz.

Conforme mostrado nas figuras 4.85 e 4.86, há uma correspondência qualitativa entre os deslocamentos experimentais e teóricos.

4.4.4. Piezocompósito tipo 1-3 com Ângulo de 90° entre as Direções de Corte

As figuras 4.87 e 4.88 mostram as curvas experimentais e teóricas da condutância e da susceptância elétrica para o piezocompósito tipo 1-3.

Figura 4.87. Curva de condutância elétrica em função da frequência para o piezocompósitos tipo 1-3.

Figura 4.88. Curva da susceptância elétrica em função da frequência para o piezocompósitos tipo 1-3.

A partir da curva de condutância do piezocompósito do tipo 1-3 foram calculados a largura de banda de 8% e o fator de acoplamento eletromecânico efetivo de 0,61.

As figuras de 4.89 a 4.94 mostram os deslocamentos máximos perpendiculares à superfície do piezocompósito tipo 1-3 com ângulo de 90° entre as direções de corte quando aplicado um filtro passa banda para as várias faixas de frequências indicadas nas figuras. Em todas essas figuras, a região indicada com um círculo em vermelho na superfície do piezocompósito deve ser desconsiderada na análise, pois é o local onde fica a solda dos fios eletrodos. Para a faixa de frequências de 600 a 700 kHz (figura 4.89), os deslocamentos máximos de aproximadamente 0,15 nm estão distribuídos em toda a superfície do piezocompósito. Para a faixa de 701 e 800 kHz (figura 4.90), que contém a banda do transdutor, têm-se os maiores valores de deslocamentos, cujos valores máximos são de aproximadamente 0,35 nm. Já nas faixas de frequências de 801 a 900 kHz, 901 a 1000 kHz, 1001 a 1100 kHz e 1101 a 1200kHz, os valores máximos de deslocamentos são de 0,15, 0,04, 0,02 e 0,02 nm, respectivamente. Esses valores apresentam amplitudes de deslocamentos bem menores que as amplitudes obtidas na banda do transdutor.

Figura 4.89. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 600 a 700 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.

Figura 4.90. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 701 a 800 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.

Figura 4.91. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 801 a 900 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.

Figura 4.92. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 901 a 1000 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.

Figura 4.93. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.

Figura 4.94. Deslocamentos máximos experimentais para faixa de frequência de 1001 a 1100 kHz para o piezocompósito tipo 1-3.

As figuras 4.95 e 4.96 mostram os deslocamentos perpendiculares à superfície do piezocompósito 1-3. Na figura 4.95 são mostrados os deslocamentos experimentais medidos com uma excitação de 750 kHz e na figura 4.96, os deslocamentos teóricos calculados no ANSYS com excitação de 732 kHz.

Figura 4.95. Deslocamento experimental na direção de espessura medido a 750 kHz.

Figura 4.96. Deslocamento teórico na direção de espessura medido a 732 kHz.

Conforme mostrado nas figuras 4.95 e 4.96, o resultado da simulação concorda com o resultado experimental, pois há uma correspondência entre as regiões com deslocamentos máximos e mínimos nessas duas situações.

A tabela 4.5 mostra o coeficiente de acoplamento eletromecânico efetivo e a largura de banda dos piezocompósitos circulares descritos nesta seção.

Tabela 4.5. Fator de acoplamento eletromecânico efetivo e largura de banda

Tipo de piezocompósito com cortes:	Fator de acoplamento eletromecânico efetivo	Largura de banda (%)
gradados em 1 direção	0,59	23
gradados em 2 direções a 45°	0,64	22
gradados em 2 direções a 90°	0,59	15
tipo 1-3 em 2 direções a 90°	0,61	8

O fator de acoplamento eletromecânico praticamente se manteve inalterado quando comparados o piezocompósito tipo 1-3 com os gradados em duas direções, tanto no caso dos cortes defasados de 45°, como nos de 90°. Além disso, todos os piezocompósitos gradados apresentaram uma largura de banda superior à do piezocompósito do tipo 1-3. Isso é interessante para a fabricação de transdutores capazes de gerar pulsos mais estreitos.

4.5. Resultado da largura de banda e do fator de acoplamento eletromecânico para os piezocompósitos simulados

Nesta seção são apresentados os valores da largura de banda calculados para os piezocompósitos com cortes simétricos em relação a um plano de simetria, para os piezocompósitos com cortes simétricos em relação a dois planos de simetria e para os piezocompósitos com profundidade de cortes constantes. A tabela 4.6 mostra os valores calculados da largura de banda dos piezocompósitos simulados com elementos finitos bidimensionais e que contém cortes gradados simétricos com relação a seção transversal. O piezocompósito P12 com um ângulo de 8 graus foi o que apresentou maior largura de banda que foi de 4,14%.

Tabela 4.6. Largura de banda dos piezocompósitos retangulares com um plano de simetria

Piezocompósitos	Ângulo (°)	Largura de banda (%)
P1	1,0°	2,24
P2	1,5°	2,41
P3	2,0°	2,97
P4	2,5°	2,96
P5	3,0°	2,71
P6	3,5°	3,31
P7	4,5°	2,82
P8	5,0°	2,45
P9	5,5°	2,27
P10	6,5°	2,39
P11	7,0°	3,72
P12	8,0°	4,14
P13	9,5°	3,52
P14	10,5°	2,38

A tabela 4.7 mostra os valores calculados da largura de banda para os piezocompósitos com cortes gradados simétricos com relação à seção transversal e longitudinal e que foram obtidos por simulação bidimensional. O piezocompósito PS2 construído com um ângulo de 2 graus foi o que apresentou maior largura de banda que foi de 11,89%.

Tabela 4.7. Largura de banda dos piezocompósitos retangulares com dois planos de simetria

Piezocompósitos	Ângulo (°)	Fator de acoplamento eletromecânico	Largura de banda (%)
PS1	1,0°	0,33	4,6%
PS2	2,0°	0,49	11,89%
PS3	2,5°	0,50	8,75%
PS4	3,0°	0,54	3,12%
PS5	3,5°	0,52	2,74%
PS6	4,5°	0,5329	2,66%
PS7	5,0°	0,5393	2,39%
PS8	5,5°	0,3559	2,2%
PS9	6,5°	0.3058	5%

A tabela 4.8 mostra os valores calculados da largura de banda para os piezocompósitos com cortes não gradados e que foram obtidos por simulação bidimensional. Observa-se para estes piezocompósitos que a largura de banda varia muito pouco com relação à profundidade dos cortes.

Tabela 4.8. Largura de banda dos piezocompósitos retangulares com cortes de profundidade constantes

Piezocompósitos	Profundidade (h)	Largura de banda
PP1	2,00 mm	2,28%
PP2	1,75 mm	2,52%
PP3	1,50 mm	2,20%
PP4	1,25 mm	2,18%
PP5	1,00 mm	2,34%
PP6	0,75 mm	2,14%
PP7	0,50 mm	1,91%
PP8	0,25 mm	2,18%

Da análise dos resultados obtidos nas três tabelas acima, verifica-se que o ângulo de inclinação dos cortes influencia na largura de banda. Além disso, verifica-se que a simetria dos cortes também influencia na largura de banda. Contudo é importante frisar que o piezocompósito com simetria em dois planos apresentou maior largura de banda (melhor resultado de 11,89% para ângulo de inclinação de 2

graus) ao passo que o piezocompósito com simetria em apenas um ângulo apresentou maior valor da largura de banda de 4,14% quando considerando um ângulo de inclinação de 8 graus.

4.6. Caracterização das Membranas Porosas

A caracterização das três membranas (mixed esters, nitrate cellulose e cellulose ester) foi feita ajustando a curva teórica à curva experimental do coeficiente de transmissão, usando a equação (6.55). Foram determinados o coeficiente de transmissão, a frequência de ressonância para meio comprimento de onda, a velocidade de propagação longitudinal e o coeficiente de atenuação.

A tabela 4.9 apresentam os dados calculados para a membrana porosa.

Tabela 4.9. Dados medidos nas membranas caracterizadas.

Membrana	Velocidade (m/s)	Freq. de ressonância. /2(MHz)	Coef. deatenuação em /2 (Np/m)	<i>n</i>
Mixed esters	284,44	1,094	2821	0,60
Nitratecellulose	327,80	1,490	2844	0,33
Celluloseester	441,60	1,840	3463	0,29

As figuras 4.97, 4.98 e 4.99 mostram os sinais experimentais obtidos com e sem membrana e os coeficientes de transmissão em intensidade, experimental e teórico, para os três tipos de membrana. As aquisições do sinal de referência (sem membrana) e do sinal medido (com membrana) foram feitas aplicando-se ganhos de, respectivamente, 11,3 dB e 25,3 dB. Em ambos os casos, foi utilizada uma tensão de excitação de 40 V.

Figura 4.97. Dados para a membrana mixed esters. Sinal no tempo com e sem membrana (a). Coeficiente de transmissão teórico e experimental (b)

Figura 4.98. Dados para a membrana nitrate cellulose. Sinal no tempo com e sem membrana (a). Coeficiente de transmissão teórico e experimental (b)

Figura 4.99. Dados para a membrana celulose ester. Sinal no tempo com e sem membrana (a). Coeficiente de transmissão teórico e experimental (b)

4.7. Transdutores para Emissão em Ar

A figura 4.100 mostra a foto do transdutor piezocompósito 1-3.

Figura 4.100. Transdutor fabricado com o piezocompósito 1-3.

A figura 4.101 mostra a foto do transdutor piezocompósito gradado com 90° entre as direções de corte.

Figura 4.101. Transdutor fabricado com o piezocompósito gradado com cortes a 90° entre as direções de corte.

A figura 4.102 mostra as curvas de condutância e susceptância experimental para o transdutor fabricado a partir do piezocompósito 1-3. Nessa figura são mostrados três curvas, sendo que uma se refere somente ao piezocompósito, a outra se refere ao transdutor montado com o piezocompósito e uma camada de acoplamento frontal de epóxi e a outra se refere ao transdutor montado com o piezocompósito mais as camadas de acoplamento frontal de epóxi e de membrana porosa.

Figura 4.102. Condutância e susceptância do transdutor obtido a partir do piezocompósito 1-3

A figura 4.103 mostra as curvas teóricas e experimentais da condutância e da susceptância para o transdutor piezocompósito 1-3 com uma camada de epóxi de espessura de aproximadamente 1/4 do comprimento de onda. A curva teórica foi obtida usando o modelo da matriz distribuída.

Figura 4.103. Condutância e susceptância do transdutor obtido a partir do piezocompósito 1-3 com uma camada de acoplamento.

Na tabela 4.10 são mostrados os parâmetros usados no modelo da matriz distribuída para geração das curvas teóricas.

Tabela 4.10. Parâmetros do modelo da matriz distribuída

R	10e-3 (m)	Raio do piezocompósito 1-3
Esp	2e-3 (m)	Espessura do piezocompósito 1-3
Den	5740 (Kg/m ³)	Densidade do piezocompósito 1-3
k _t	0,66	Fator de acoplamento mecânico do piezocompósito 1-3
VCc	3818 (m/s)	Velocidade de propagação longitudinal do piezocompósito 1-3
ε ₃₃	5,58e-9	Constante dielétrica do piezocompósito 1-3
e ₃₃	14,21(C/N)	Constante piezelétrica do piezocompósito 1-3
Zc	21,91 (Mrayl)	Impedância acústica do piezocompósito 1-3
Co	8,76e-10 (F)	Capacitância do piezocompósito 1-3
Vm1c	2600 (m/s)	Velocidade de propagação longitudinal na camada de acoplamento frontal
Espm1	8,66e-4 (m)	Espessura da camada de acoplamento frontal
Denm1	1100 (Kg/m ³)	Densidade na camada de acoplamento frontal
Zm1	2,86 (Mrayl)	Impedância acústica na camada de acoplamento frontal
Va	345 (m/s)	Velocidade de propagação no ar
Dena	1,2 (Kg/m ³)	Densidade do ar
Za	414 (rayl)	Impedância acústica no ar

A figura 4.104 mostra a curva teórica da condutância e da susceptância para o transdutor piezocompósito 1-3 sem nenhuma camada de acoplamento. A curva teórica foi obtida usando o modelo da matriz distribuída.

Figura 4.104. Condutância e susceptância do transdutor obtido a partir do piezocompósito 1-3 sem camadas de acoplamento.

A figura 4.105 mostra as curvas de condutância e susceptância experimental para o transdutor montado a partir do piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de cortes. São mostradas as curvas para a seguinte montagem do piezocompósito: sem camada de acoplamento, com uma camada de acoplamento (resina epóxi) e com duas camadas de acoplamento (resina epóxi e membrana porosa).

Figura 4.105. Curvas de condutância e susceptância do transdutor obtido a partir do piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de cortes.

As figuras 4.106 e 4.107 mostram a resposta impulsiva e a resposta em frequência do transdutor piezocompósito do tipo 1-3.

Figura 4.106. Resposta Impulsiva do transdutor piezocompósito do tipo 1-3.

Figura 4.107. Transformada de Fourier do sinal (figura 4.106) gerado pelo transdutor piezocompósito do tipo 1-3.

As figuras 4.108 e 4.109 mostram a resposta impulsiva e a resposta em frequência do transdutor piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.

Figura 4.108. Resposta Impulsiva do transdutor piezocompósito do tipo gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.

Figura 4.109. Transformada de Fourier do sinal (figura 4.108) gerado pelo transdutor piezocompósito gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte.

Os transdutores ultrassônicos construídos tipo 1-3 e gradado com ângulo de 90° entre as direções de corte apresentaram amplitudes máximas, respectivamente, de 0,06 volts e 0,057 volts, quando analisados pela resposta impulsiva. Observa-se um aumento na largura de banda do transdutor com piezocompósito gradado quando comparada a largura de banda do transdutor com piezocompósito 1-3.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Dois tipos de modelagem com elementos finitos foram realizados para a simulação de piezocompósitos com gradação. A modelagem usando estado plano de deformação foi usada para simular piezocerâmicas retangulares. A modelagem tridimensional foi aplicada tanto a piezocerâmicas retangulares quanto a piezocerâmicas circulares. A comparação entre as duas modelagens aplicadas a cerâmicas retangulares puras permitiu concluir que quando a dimensão da profundidade da cerâmica é igual ou maior que o dobro da largura, o estado plano de deformação pode ser adotado. Nesse caso, têm-se resultados similares a um menor custo computacional, com um erro de aproximadamente 5% nas curvas de condutância e susceptância elétrica. Conclui-se que o estado plano de deformação pode ser adotado reduzindo-se o custo computacional.

As curvas de impedância elétrica, bem como os deslocamentos teóricos e experimentais dos piezocompósitos apresentaram boa concordância. A principal característica de piezocompósitos com gradação de densidade é o aumento da largura de banda. Ao analisar as curvas de condutância experimentais, verifica-se que a largura de banda de piezocompósitos com gradação de densidade com profundidades de cortes variáveis foi maior do que aquela apresentada por piezocompósitos 1-3. O piezocompósito com configuração do tipo 3 apresentou maior largura de banda enquanto o piezocompósito com configuração do tipo 2 apresentou maior fator de acoplamento eletromecânico.

Através de simulação bidimensional em piezocompósitos retangulares foi observado que a largura de banda depende da distribuição dos cortes com relação a seção transversal e longitudinal. No caso dos cortes simétricos em relação à seção transversal o piezocompósito do tipo P12 com uma inclinação de cortes de 8 graus foi o que apresentou maior largura de banda que foi no valor de 4,14%. No caso dos cortes simétricos em relação à seção transversal e longitudinal foi observado que o piezocompósito PS2 com um ângulo de 2 graus a largura de banda foi de 11,89 %. Sendo assim, verifica-se que neste segundo caso, com os cortes simétricos em relação a seção longitudinal permitiu um aumento de 3 vezes da largura de banda comparado ao piezocompósito com simetria apenas na seção transversal.

Foram realizados testes de caracterização das membranas porosas. Obteve-se experimentalmente o coeficiente de transmissão em função da frequência, a frequência de ressonância $\lambda/2$ e o coeficiente de atenuação. Houve uma boa concordância entre os dados experimentais e teóricos. Uma dessas membranas foi usada na fabricação dos protótipos de transdutor para emissão em ar. Conclui-se que essa técnica de caracterização de membrana porosa pode ser usada na escolha das camadas de acoplamento.

Um dos piezocompósitos gradados circular com cortes em duas direções defasadas de 90° foi usado para construir um transdutor de ultrassom para emissão em ar, bem como o piezocompósito 1-3 circular. O piezocompósito com gradação de densidade usado na construção do transdutor permitiu aumentar a largura de banda em relação à largura de banda do transdutor construído com piezocompósito 1-3.

5.2. Trabalhos Futuros

Desenvolver técnicas de caracterização de membranas porosas utilizando transdutores para emissão em ar a fim de determinar o coeficiente de transmissão, a frequência de ressonância, a velocidade de propagação e o coeficiente de atenuação sem o uso da camada de acrílico.

Caracterizar as propriedades das cerâmicas piezelétricas e das camadas de acoplamento frontais (p. ex. acrílico e membrana porosa) em função da temperatura. No caso da membrana porosa, também deve ser caracterizada em relação à umidade relativa do ar.

Implementar algoritmos de otimização da largura de banda e do coeficiente de acoplamento eletromecânico para os piezocompósitos com gradação de densidade variando, por exemplo, a profundidade, a largura e o passo dos cortes. O algoritmo será implementado a partir do `fminsearch` e de um algoritmo genético. A otimização será em um piezocompósito bidimensional tipo 2-2. A configuração de corte obtida será realizada em um piezocompósito circular nas duas direções perpendiculares.

Montar e caracterizar pares de transdutores para emissão em ar com geometrias e gradações de densidade variadas obtidas na otimização. Caracterizar o campo acústico desses novos transdutores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMOWSKI, J.C., MATUDA, M.Y., SIGELMANN, R.A., BUIOCHI, F., FURUKAWA, C.M., %Combination of analytic and finite element methods to obtain acoustic fields in complex structures driven by piezelectric multi-layered transducers+, In: **IEEE International Ultrasonics Symposium**, Toronto, 1997, p. 955-958.

ALVAREZ, N. L. P. I.; ANDRADE, M. A. B. I ; BUIOCHI, F.. %Identification of elastic, dielectric, and piezoelectric constants in piezoceramic disks+, **IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL**, 2010 v.57, n.12, p.2772-2783.

ANDRADE, M.A.B., BUIOCHI, F., ADAMOWSKI, J.C., %Modelagem de Transdutores Piezelétricos de Ultra-Som para Fisioterapia utilizando o Método dos Elementos Finitos+, In: **XV Congresso Brasileiro de Automática (CBA2004)**, Gramado, RS, 2004.

ANDRADE, M. A.B., **Análise de Materiais Piezelétricos Compósitos para Aplicações em Transdutores de Ultrassom**, dissertação de mestrado, São Paulo . Brasil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

ARENAS, T. E. G. A. %A nondestructive integrity test for membrane filters bases o air-coupled ultrasonic spectroscopy+,**IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroeletrics, ans Frequency Control**, 2003, Vol. 50, nº 6, p. 676-685.

ARENAS, T. E. G., %Acoustic Impedance Matching of Piezoelectric Transducer to the Air+, In: **IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control**, 2004, vol. 51, p. 624-633.

ARENAS, T.E.G.A, ESPINOSA, F.R. GIRONA, M. R. M, ROIG, A., MOLINS, E. Viscoelasticity of silica aerogels at ulttasonic frequencies. Apllieds Physics Letters, 2002, Vol. 81,nº 7, p. 1198.

AULD, B. A., **Acoustic Fields and Waves in Solids**, John Wiley & Sons, New York, USA, 1973, p. 360-379.

BLOMME, E., BULCAEN, D., DECLERCQ, F., "Recent observations with air-coupled NDE in the frequency range of 650kHz to 1.2MHz", In: **Ultrasonics**, 2002, vol. 40, p. 153-157.

CHEN, G., PAN, C., LIN, Y., CHENG, J., "Assessing the Relationship Between the Inter-Rod Coupling and the Efficiency of Piezocomposite High-Intensity Focused Ultrasound", In: **Ultrasonics**, 2014, vol. 54, p. 789-794.

FERRANTE, F., **Modellazione col Metodo degli Elementi Finiti (FEM) di Transduttori Ultrasonici**, Tesi di Laurea, Università degli Studi Roma Tre, Roma, 2002.

FUKUDA, H., OMURA, M., MIZUGUCHI, T., "Ultrasonic Transducer and Method of Manufacturing the Same", **Patent** N° US 6,995,501 B2, 2006.

GENG, X., ZHANG, Q.M. "Resonance Modes and Losses in 1-3 Piezocomposites for Ultrasonic Applications", **Journal of Applied Physics**, 1999, v. 85, n. 3, p. 1342-1350.

HAN, K., ROH, Y., "The performance of a 1-3 mode piezocomposite ultrasonic transducer in relation to the properties of its polymer matrix", In: **Sensors and Actuators**, 1999, Vol. 75, p. 176-185.

HSU, D. K., "Nondestructive Testing Using Air-Borne Ultrasound", In: **Ultrasonics**, 2006, vol. 44, p. e1019 - e1024.

HAYWARD, G., "Air coupled NDE . Constraints and solutions for industrial implementation", In: **IEEE Ultrasonics Symposium**, 1997, p. 665-673.

HAYWARD, G., GACHAGAN, A., "An evaluation of 1-3 connectivity composite transducers for Air-Coupled Ultrasonic Applications", In: **Journal Acoust Soc. Am.**, 1996, Vol. 99, p. 2148-2157.

HIRSEKORN, S., GEBHARDT, W., ARNOLD, W., "Modeling of Graded 1-3 Composite Piezoelectric Transducers", In: **Materials Science Forum**, 1999, vols. 308, p. 521-526.

IEEE. Publicação e revisão proposta da ANSI/IEEE standard 176-1987 'ANSI/IEEE standard on piezoelectricity', *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1996, vol. 43, N° 5, p. 717-772.

IKEDA, T., **Fundamentals of Piezoelectricity**, Oxford, Inglaterra. Oxford University Press, 1996.

KELLY, S.P., HAYWARD, G., ALVARES-ARENAS, T.E.G., "An Air-Coupled Ultrasonic Matching Layer Employing Half Wavelength Cavity Resonance", In: **IEEE Ultrasonics Symposium**, 2001, p. 965-968.

KELLY, S.P., HAYWARD, G., ALVARES-ARENAS, T.E.G., "Characterization and assessment of an integrated matching layer for air-coupled ultrasonic applications", In: **IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control**, 2004, vol. 51, p. 1314-1323.

KINO, G.S., **Acoustics Waves -Devices, Imaging & Analog Signal Processing**, Prentice Hall, New Jersey, USA, 1987.

KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B., SANDERS, J. V., **Fundamentals of Acoustics**, John Wiley & Sons, 1982.

LAMBERTI, N., ESPINOSA, F. R. M., IULA, A., CAROTENUTO, R., "Two-Dimensional Modelling of Multifrequency Piezocomposites", In: **Ultrasonics**, 2000, vol. 37, p. 577-583.

LAMBERTI, N., GIUA, P. E., PAPPALARDO, M., "Modello Matriciale e suo Impiego Nell'ottimizzazione della Risposta Impulsiva del Trasduttore Multielemento", In: **Relatório Técnico**, Università di Salerno, 1987.

LERCH, R., "Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and Three-Dimensional Finite Elements", In: **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, 1990, vol.37, N° 2, p. 233-247.

MANZANARES, A. O., ESPINOSA, F. M., "Air-Coupled Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers with Resonant Cavities", In: **Ultrasonics**, 2012, vol. 52, p. 482 - 489.

MANZANARES, A. O., ESPINOSA, F. M., "Air-Coupled MUMPS Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers with Resonant", In: **Ultrasonics**, 2012, vol. 52, p. 482-489.

NADER, GILDER. **Desenvolvimento de técnicas de caracterização de transdutores piezelétricos**. Tese de doutorado.USP, 2002.

NAILLON, M., COURSAINT, H. H., BESNIER, F. "Analysis of Piezoelectric Structures by a Finite Element Method", In: **Acta Electronica**, 1983, vol. 25, N° 4, p. 341-362.

NEUNHAM, R. E., BOWEN, L. J., KLINKER, K. A., CROSS, L. E. "Composite Piezoelectric Transducers", In: **Materials in Engineering**, 1980, vol. 2, 93-106.

NORMA ASTM E1065-08."Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units". In: **ASTM International**, 2008.

PÉREZ, N., ANDRADE, M. A. B., BUIOCHI, F., ADAMOWSKI, J. C., "Identification of Elastic, Dielectric, and Piezoelectric Constants in Piezoceramic Disks", In: **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, 2010, vol. 57, N° 12, p. 2772-2783.

QI, W., CAO, W. "Finite Element Analysis and Experimental Studies on the Thickness Resonance of Piezocomposite Transducers", in: **Ultrasonic Imaging**, 1996, v. 18, n.1-9.

RAMADAS, C., AVINASH, H., IRFAN, K., KRISHNAN, B., MAKARAND, J., "An Experimental Study on the Behavior of A_0 Mode Transduced Using Misaligned Air-Coupled Transducers in Composite Laminates", In: **Applied Acoustics**, 2014, vol. 83, p. 141-149.

RAMADAS, A., HOOD, A., Khan, I., BALASUBRAMANIAM, K., "Effect of Misalignment of Air-Coupled Probes on A_0 Lamb Mode Propagating in a Metal", In: **Ultrasonics**, 2014, vol. 54, p. 1401-1408.

ROSENBAUM, J., F., **Bulk Acoustic Wave Theory and Devices**, Artech House, Boston, USA, p. 125, 1988.

SANCHEZ, M. S., ESPINOSA, F. R. M; EMETERIO, L. S. "Multifrequency (1-3) piezoelectric composites", IEEE 7th International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 1990, p. 73-76.

SÁNCHEZ, S., ESPINOSA, F. R. M., LAMBERTI, N., "Multifrequency Piezoelectric Composites: One-Dimensional Modeling", In: **Ultrasonics**, 1999, vol. 37, p. 97-105.

SABER, S., ABDULLAH, A., "Determination of Acoustic Impedance of Multi Matching layer for Narrowband Ultrasonic Transducers at Frequencies < 2.5 MHz . Application of a genetic Algorithm", In: **Ultrasonics**, 2012, vol. 52, p. 169-185.

SATYANARAYAN, L., HABERMAN, M. R., BERTHELOT, Y. H., "Cellular Polypropylene Polymer Foam as Air-Coupled Ultrasonic Transducer Materials", In: **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, 2010, vol. 57, N° 10, p. 2343-, 2355.

SMITH, W. A., AULD, B. A., "Modeling 1-3 Composite Piezoelectrics: Thickness-Mode Oscillations", In: **IEEE Trans. on Ultras., Ferroelec., and Freq. Contr.**, 1991, vol. 38, n. 1, p. 40-47.

SVILAINIS, L., CHAZIACHMETOVAS, A., DUMBRAVA, V., "Efficient High Voltage Pulser for Piezoelectric Air Coupled Transducer", In: **Ultrasonics**, vol. 53, p. 225-231, 2013.

SOLODOV, I., BUSSE, G., "Nonlinear Air-Coupled Emission: The Signature to Reveal and Image Microdamage in Solid Materials", In: **Applied Physics Letters**, 2007, vol. 91, p. 1 - 3.

WAAG, G., HOFF, L., NORLI, P., "Air-Coupled Ultrasonic Through-Transmission Thickness Measurements of Steel Plates", In: **Ultrasonics**, 2015, vol. 56, p. 332-339.

WU, H., Lin, J., GAO, H., and SHU, Y., "Optimization of Composite Transducer Designing in High Frequency Applications", In: **IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control**, 2000, vol. 47, N°. 6, p. 1610-1614,

YAMADA, K., SAKAMURA, J., NAKAMURA, K. "Broadband Transducers Using Effectively Graded Piezoelectric Plates for Generation of Short-Pulse Ultrasound", In: **The Japan Society of Applied Physics**, 1999, Vol. 38, pp. 3204-3207.

YAMADA, K., OHKUBO, A., NAKAMURA, K. "Limited-Diffraction-Beam Ultrasound Transducers of Conical Type with Enhanced Time Resolution Fabricated Using a Functionally Graded Piezocomposite", In: **The Japan Society of Applied Physics**. 2003, Vol. 42, pp. 5353-5356.

YANO, T., TONE, M., FUKUMOTO, A., "Range Finding and Surface Characterization Using High-Frequency Air Transducers", In: **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, 1987, vol. UFFC-34, N° 2, p. 232-236.

Yin, J., Lee, M., Brown, J., Chérin, E., Foster, F. S. "Effect of Triangular Pillar Geometry on High-Frequency Piezocomposite Transducers", **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, 2010, vol. 57, N° 04, p. 957-968.