CARLOS ARTURO BURBANO REYNA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TRANSDUTORES
PIEZOCERÂMICOS PARA ACOPLAMENTO EM
AR**

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

São Paulo
2019

CARLOS ARTURO BURBANO REYNA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TRANSDUTORES
PIEZOCERÂMICOS PARA ACOPLAMENTO EM
AR**

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

Área de Concentração:

Engenharia de controle e automação Mecânica

Orientador:

Prof. Dr. Flávio Buiochi

São Paulo
2019

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

São Paulo, 5 de dezembro de 2019.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Burbano Reyna, Carlos Arturo

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TRANSDUTORES PIEZOCERÂMICOS PARA ACOPLAMENTO EM AR/ Burbano Reyna. – ed. rev. – São Paulo, 2019.

92 p.

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

1. Projeto - Caracterização-Construção. 2. Piezocerâmicos . 3. 4. Camadas acoplamento. Emissão no ar.1 Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. II. t.

Nome: Burbano Reyna, Carlos Arturo

Título: Projeto e Construção de Transdutores Piezocerâmicos para Acoplamento em Ar

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Aprovado em:

Banca Examinadora

Assinatura: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

À minha Mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Josefina e Arturo, pelo apoio incondicional e por todo amor e carinho que me deram toda minha vida.

Ao meu irmão, Fernando, por toda a preocupação que sempre tivera para que eu tivesse condições de estudar.

À minha namorada, Cláudia, pelo apoio, amor e paciência incondicional para que eu pudesse continuar nesta pesquisa.

Ao meu orientador, Flávio Buiochi, por todo conhecimento e confiança que me passou.

Aos colegas do laboratório, José Henrique, José Hilton, Alberto Duran, Estevão Patrício, Timóteo Francisco e Tayran Mila por terem me auxiliado no dia a dia nas diversas dificuldades do projeto.

Ao meu professor e amigo, Ediguer Franco, por todos as conversas legais e conselhos.

À Maria Villegas e o Dr. professor Pedro Vidinha pela ajuda no Laboratório da Química da USP.

À CAPES e FAPESP (processo n.2017/13094-4) pelo apoio financeiro à realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações

Lista de Tabelas

Símbolos

RESUMO

ABSTRACT

1	Introdução	14
1.1	Introdução	14
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos	16
1.4	Organização	17
2	Fundamentos Teóricos	19
2.1	Propagação de ondas acústicas	19
2.2	Impedância Acústica	21
2.3	Reflexão e Transmissão	22
2.4	Atenuação	25
2.5	Camadas passivas	27
2.5.1	Camadas de acoplamento para emissão em ar	28
2.6	Materiais piezelétricos	29
2.7	Modelo matricial do transdutor	35
2.8	Elementos Finitos	40

2.8.1	Parâmetros de configuração	41
3	Projeto de transdutores para acoplamento em ar	43
3.1	Espessura, impedância e atenuação da camada de acoplamento	43
3.2	Quantidade de camadas	48
3.3	Sintonização da Cerâmica	51
3.4	Camada adesiva	52
3.5	Parâmetros de projeto	53
3.6	Campo acústico usando o Método de Elementos Finitos (MEF)	54
4	Materiais e Métodos	58
4.1	Elemento ativo	58
4.2	Potenciais camadas de acoplamento	59
4.2.1	Camadas de filtragem	59
4.2.2	Aerogel	60
4.2.3	Resina Epóxi e adesivo	62
4.3	Caracterização das camadas passivas	63
4.4	Construção e caracterização das cerâmicas e dos protótipos	65
4.5	Forma de onda e campo acústico	68
4.6	Discussão	70
5	Resultados	71
5.1	Caracterização das potenciais camadas de acoplamento	71
5.2	Comportamento elétrico e mecânico nas etapas de construção	75
5.2.1	Piezocompósito	75
5.2.2	Adição das camadas	76
5.2.3	Resposta na amplitude	80

5.2.4	Pulso-Eco, forma de onda e campo acústico	82
5.2.5	Comparação campo acústico FEM e o experimental	84
5.3	Protótipos com camadas de aerogel	87
5.4	Discussão	87
6	Conclusões e trabalhos futuros	89
6.1	Conclusões	89
6.2	Trabalhos futuros	90
	Referências	91

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Montagem experimental para detecção de defeitos em tecidos usando transdutor para acoplamento em ar com focalização híbrida.	15
2	Volume de controle.	20
3	Propagação em a) dois meios b) três meios.	22
4	Atenuação geométrica.	26
5	Condições de contorno do elemento ativo em modo espessura (seção transversal A_e , e Força=0).	33
6	Esquemas do modelo matricial.	38
7	a) Geometria, materiais, b) física usada em cada domínio e c) grau de discretização e condições das bordas programado no COMSOL para um transdutor para acoplamento em fluidos.	42
8	T_I vs λ e frequência com variações de Z_2 com $Z_{1,3} = 414 rayl$	44
9	T_I para diversos valores de Z_2	46
10	T_I em função Z_2	47
11	T_I em função Z_2 variando α_λ	47
12	Efeito da quantidade de camadas sobre a impedância acústica Z_a das n camadas.	48
13	Efeito das camadas na resposta medida no ar, considerando $c_{cam1} =$ constante.	49
14	Efeito das camadas na banda de resposta com propriedades reais.	51
15	Efeito das perdas e diminuição na rigidez no elemento ativo.	52
16	Efeito do tamanho do elemento triangular da malha no resultado do campo acústico. Vermelha = mínimo tamanho certo para simulação em água, Verde = tamanho aplicada neste trabalho para simulação de emissão em água e ar.	55

17	Distribuição de pressão acústica normalizada para transdutores acoplados a a)água e b)ar em excitação contínua com restrição no deslocamento radial.	56
18	Distribuição de pressão acústica normalizada para transdutores acoplados a a)água e b)ar em excitação contínua sem restrição no deslocamento radial.	57
19	Materiais para a síntese do aerogel	61
20	Esquema da montagem para caracterização das camadas porosas . . .	63
21	Montagem experimental de caracterização de camadas porosas: vista geral (lado esquerdo) e detalhe (lado direito)	64
22	Montagem experimental para caracterização das cerâmicas	65
23	Corte das cerâmicas e fabricação do piezocompósitos	66
24	Protótipos fabricados	67
25	Montagem usando o modo de operação transmissão	68
26	Montagem Pulso-Eco	68
27	Montagem experimental para medição do campo acústico	69
28	Resposta mecânica das camadas no domínio temporal	71
29	Resposta mecânica das camadas no domínio da frequência	72
30	Comparação dos coeficientes de transmissão teórico e experimentais nas camadas caracterizadas	73
31	Resposta Mecânica da camada de epóxi	74
32	Respostas elétricas teórica e experimental dos sistemas APC855 e Pz37 puros e piezocompósito $dBs = 20\log_{10}\left(\frac{ Y }{ Y_{max} }\right)$	75
33	Comportamento elétrico G condutância e B susceptância	77
34	Comportamento elétrico (condutância e susceptância) dos protótipos baseados em APC855 puro e piezocompósito	78
35	Comportamento elétrico (condutância e susceptância) dos protótipos baseados em Pz37 puro e piezocompósito	79

36	Sinais medidos no modo transmissão-recepção dos protótipos 1 (APC855 puro) e 2 (APC855 compósito) com e sem adição das camadas de acoplamento acústico	81
37	Sinais medidos no modo transmissão-recepção dos protótipos 3 (Pz37 puro) e 4 (Pz37 compósito) com e sem adição das camadas de acoplamento acústico	82
38	Respostas do protótipo 1 (APC855 puro) operando em modo pulso-eco para as seguintes posições do do refletor: a) 6,6 cm e b) 7,4, 6,5 e 5,3 cm	83
39	Distribuição de pressão no instante $t = 87,5\mu s$	83
40	Campo acústico experimental normalizado	84
41	Distribuições axial (a) e transversal em $Y = 30$ mm dos transdutores protótipo 1 (APC855 puro) e comercial (Ultran 0,5 MHz)	85
42	Comparação entre o campo acústico obtido pelo MEF e o medido a 395 kHz	86
43	Comparação das distribuições axial (a) e transversal (em $Y=15$ mm) (b) obtidas pelo MEF e com dados experimentais	86
44	Fotos das camadas de aerogel sintetizadas após a secagem	87

LISTA DE TABELAS

1	Parâmetros de projeto considerando como elemento ativo o APC855 puro (Protótipo 1)	53
2	Parâmetros de projeto considerando como elemento ativo o compósito APC855 (Protótipo 2)	53
3	Parâmetros de projeto considerando como elemento ativo o Pz37 puro (Protótipo 3)	53
4	Parâmetros de projeto considerando como elemento ativo o compósito Pz37 (Protótipo 4)	54
5	Parâmetros de projeto considerando como elemento ativo o APC855 puro (Protótipo 5)	54
6	Materiais usados na fabricação dos protótipos	62
7	Concentração de material semicondutor nos ressonadores	66
8	Propriedades mecânicas das camadas	74
9	Propriedades estimadas nos ressonadores piezocerâmicos e piezocompósitos	76
10	Propriedades usadas no modelo matricial para ajustar as curvas de condutância e susceptância aos dados experimentais obtidos com os protótipos: 1(APC855 puro), 2(APC855 compósito), 3(Pz37 puro) e 4(Pz37 compósito).	80

Quantidade física	Símbolo	Unidade SI
Tensão mecânica	σ_i	$N.m^{-2}$
Deformação mecânica	τ_i	1
Força	F	$kg.m.s^{-2}$
Deslocamento da partícula	ξ_m	1
Tempo	t	s
Direção de propagação	z	m
Espessura	h, l_{cam}	m
Densidade	ρ_o	$kg.m^3$
Velocidade de propagação	c, c_{ea}, c_{cam}	$m.s^{-1}$
Velocidade da partícula	v, v_3, v_{ML}	$m.s^{-1}$
Frequência	f	s^{-1}
Comprimento de onda	λ	m
Número de onda	k	m^{-1}
Impedância acústica específica	Z_a, Z_{ea}, Z_{cam}	rayl
Pressão acústica	P_r, P_i, P_t, P_a, P_b	$N.m^{-2}$
Transmissão	T_{12}, T_{13}	1
Reflexão	R_{12}	1
Intensidade transmitida	T_I	1
Atenuação	α	$Np.m^{-1}$
Atenuação correspondente a um comprimento de onda	$\alpha_\lambda = \alpha * \lambda$	Np
Densidade de energia livre de Gibbs	G	$J.m^{-3}$
Temperatura	T	K
Densidade de entropia	S	$J.K^{-1}.m^{-3}$
Campo elétrico	E_m	$V.m^{-1}$
Deslocamento elétrico	D_m	$C.m^{-2}$
Constante elástica	C_{ij}	$N.m^{-2}$
Permeabilidade dielétrica	β_{mn}	$V.m.A^{-1}.s^{-1}$
Coefficiente piezelétrico	h_{im}	$V.m^{-1}$
Acoplamento eletromecânico no modo espessura	k_t	1
Corrente elétrica	I	amper
Tensão elétrica	V	volt
Área de emissão	A_e	m^2
Frequência angular	ω	s^{-1}
Impedância elétrica	Z_e	Ω
Admitância elétrica	Y	S
Parâmetro complexo piezelétrico genérico	φ	-
Atrasos-perdas	Ψ	rad
Coefficiente piezelétrico	e_{im}	$C.m^{-2}$
Coefficiente dielétrico	ξ_{mn}	$A.s.V^{-1}.m^{-1}$
Relação de impedâncias acústicas	ζ	1
Módulo de Poisson	ν	1
Capacitância	C_o	F

Os subíndices $i, j = 1...6$. Se j é um coeficiente ou expoente, refere-se à unidade imaginária $\sqrt{-1}$. Os subíndices $m, n = 1,2,3$ e os subíndices ea e cam refere-se ao elemento ativo e camada passiva, respectivamente.

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto e a fabricação de transdutores para acoplamento em ar. Como elementos ativos foram usados piezocerâmicos ou piezocompósitos, vibrando em modo espessura. Como elementos passivos foram usados epóxi, membranas de filtragem e aerogel (camadas de acoplamento). Os piezocerâmicos apresentaram maior sensibilidade que os piezocompósitos. Por outro lado, os piezocompósitos apresentaram banda mais larga que os piezocerâmicos. As membranas de filtragem são de fácil manipulação e permitiram camadas de alta qualidade para acoplamento em ar. Também foi estudado o aerogel como potencial camada passiva, porém houve dificuldade no processo de manipulação, resultando em fraca estabilidade da estrutura desse material, depositado diretamente sobre as cerâmicas piezelétricas. As membranas passivas e os elementos ativos foram caracterizados e submetidos aos critérios de seleção para a fabricação de protótipos. Os comportamentos elétrico e mecânico de um conjunto de protótipos foram medidos em cada etapa de construção e comparados com os resultados teóricos. Os resultados de desempenho dos protótipos em modo transmissão mostraram que a adição de membranas porosas de espessura $\lambda/4$ incrementou de três a quatro vezes a transmissão de energia entre o elemento ativo e o ar, além de ter aumentado em aproximadamente quatro vezes a largura da banda. Os resultados do modelo numérico multifísico foram comparados aos dados do campo acústico medido com um protótipo para acoplamento em ar, operando na frequência de 0,4 MHz, tendo havido boa concordância entre eles.

ABSTRACT

This work presents a design for manufacturing air-coupled ultrasound transducers. Piezoceramics or piezocomposites were used as active elements vibrating in thickness mode. Epoxy, filtration membranes and aerogel were used as passive elements (matching layers). Piezoceramics show higher sensitivity than piezocomposites. However, piezocomposites show a higher bandwidth than piezoceramics. Porous membranes are easily handling and provide high quality layers for air coupling. Aerogel was studied as a potential matching layer too, but there were handling difficulties, resulting in a fragile material structure which was synthesized directly over the piezoelectric ceramics. The passive membranes and active elements were characterized and submitted to selection criteria for manufacturing process of prototypes. The electrical and mechanical behavior of a set of prototypes were measured at each stage of construction and compared to the theoretical results. The performance of the prototypes in transmission mode shows that the addition of $\frac{\lambda}{4}$ -thick porous membranes increased three to four times the energy transmission between the active element and air, besides an increase of approximately four times in the bandwidth. The numerical multiphysics results were compared with the experimental acoustic field measured from the air transducer prototype operating at 0.4 MHz, showing a good concordance between them.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Os transdutores piezocerâmicos expandiram significativamente a gama de possibilidades de ensaios não destrutivos por ultrassom. As tecnologias baseadas em ultrassom são mais robustas, relativamente mais baratas e de fácil manipulação quando comparadas a outras de igual finalidade nas diversas configurações de uso (por exemplo, pulso-eco e transmissão e recepção), normalmente empregados em transdutores mono ou multielemento.

Para a grande parte dessas aplicações, deve-se usar algum tipo de líquido (água ou gel) ou peça sólida (acrílico ou aço) entre o transdutor e a peça (ou amostra) a ser inspecionada (ou caracterizada), a fim de facilitar a transferência de energia mecânica. Entretanto, existem aplicações que inviabilizam esses acoplamentos diretos, já que podem danificar a amostra.

Assim, certas aplicações requerem um acoplamento em ar, como as aplicações associadas à inspeção da qualidade de tecidos e fibras, à inspeção de espessura em folhas de papel e à inspeção do grau de umidade em folhas de plantas.

Um exemplo de aplicação usando acoplamento em ar é apresentado na figura 1 (OSPINA, 2012). A descontinuidade num tecido usado na fabricação de roupas é detectada por meio de um transdutor multielemento (PA concavo) baseado em ferroeletritos (focalização híbrida). Ao emitir pulsos ao mesmo tempo em todos os elementos, se gera uma frente de ondas com frequências próximas a 100 kHz, que consegue atravessar a descontinuidade no tecido e chegar até o receptor monoelemento (microfone 1/8 in) posicionado no outro lado. Se a amostra de tecido é movimentada com um sistema de posicionamento XY, o padrão de descontinuidade é mapeado em função da energia acústica que chega ao microfone. A seção com a menor quantidade de tecido apresenta os setores de maior pressão acústica. O comprimento de onda, neste caso, é próximo a

3 mm, logo a detecção de irregularidades com tamanhos menores não é possível.

Figura 1: Montagem experimental para detecção de defeitos em tecidos usando transdutor para acoplamento em ar com focalização híbrida.

Autor: Ospina J. F. (2012)

A banda de resposta típica de ferroeletritos está entre 30 kHz e 600 kHz o qual é uma de suas vantagens, além de uma baixa impedância acústica próxima a 0,04 Mrayls (ALVAREZ-ARENAS, 2013) que permite seu fácil acoplamento em ar. As desvantagens dessas tecnologias estão ligadas a sua moderada sensibilidade, baixa robustez para aplicações industriais (baixas temperaturas e fragilidade dos sensores), e limitação da emissão a altas frequências (menores que 1 MHz). É este ponto onde as tecnologias baseadas em piezocerâmicos devem ser avaliadas.

A banda de operação dos piezocerâmicos para a grande parte das aplicações está próxima dos 10 MHz, porém, a diferença da impedância acústica entre o transdutor e o ar (meio de propagação abordado neste trabalho) é de 4 a 5 ordens de grandeza, o que dificulta a transmissão de energia para o meio. Isso resulta na reflexão das ondas na interface entre os diferentes meios. Para contornar esse problema, Álvarez-Arenas (2002) propôs o uso de camadas com alta porosidade, baseadas em polietilsulfona e celulose, como camadas de acoplamento das cerâmicas para emissão no ar. Entretanto,

a restrita disponibilidade de materiais porosos como candidatos na fabricação das camadas de acoplamento, gera limites na manufatura de transdutores, o que restringe o uso destas tecnologias.

1.2 Justificativa

As técnicas de ultrassom baseadas em piezocerâmicas são extremamente úteis para as áreas médica e industrial. Tais técnicas apresentam ampla versatilidade, baixo custo e baixo consumo. Além disso, não produzem mudanças a nível molecular ou atômico nas estruturas, como ocorre em outras técnicas como raios X, PET e SPECT; as quais usam radiação ionizante.

Os aparelhos do ultrassom baseados em piezocerâmicas precisam de água ou algum líquido de densidade similar que faça o acoplamento entre o transdutor e o meio a ser inspecionado ou caracterizado, o que não é prático para materiais suscetíveis ao processo de oxidação, degradação e contaminação (no caso dos alimentos).

As técnicas comerciais de ultrassom de alta frequência (maiores que 400 kHz) acopladas ao ar implementam e adequam piezocerâmicas de banda estreita, ou seja, muito ressonantes ou de baixa resolução axial, que precisam de altas tensões elétricas de excitação. Além disso, precisam de dispositivos de pré e pós amplificação devido a grandes perdas nos processos de emissão, propagação e recepção.

Assim sendo, pretende-se desenvolver transdutores piezocerâmicos de baixo custo, de banda larga, com boa sensibilidade (Amplitudes de excitação < 10 V) e alta versatilidade e durabilidade.

1.3 Objetivos

Tendo como objetivo principal o desenvolvimento de transdutores ultrassônicos piezocerâmicos de alta frequência para acoplamento em ar, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

1. Propor critérios para a seleção de materiais ativos e passivos para a construção de transdutores para acoplamento em ar.

2. Construir piezocompósitos a partir de cerâmicas piezoelétricas APC855, Pz37 e araldite.
3. Caracterizar elementos ativos (APC855, Pz37 e os respectivos compósitos) e os elementos passivos (araldite e camadas porosas).
4. Explorar as possibilidades para a fabricação de camadas de acoplamento baseadas em aerogel.
5. Construir protótipos que operem nas frequências próximas de 0,5 e 1 MHz.
6. Implementar a montagem experimental para medição do campo acústico gerado pelos protótipos.
7. Comparar a largura de banda, a sensibilidade e a resolução axial das cerâmicas puras e dos protótipos fabricados com os modelos teóricos.

1.4 Organização

Este trabalho está focado em estudar os elementos ativos e passivos (camadas ou materiais porosos), no sentido de maximizar a transferência de energia acústica entre a cerâmica e o ar e, assim, dar continuidade à construção dos protótipos. Para isso, são descritos os processos para projetar e caracterizar os materiais ativos e passivos, a fabricação de transdutores e uma comparação de desempenho dos protótipos construídos com os modelos teóricos em suas diversas etapas.

No capítulo 2, são descritos os fenômenos acústicos e elétricos em cada um dos elementos que constituem o transdutor, além das interações entre eles, com objetivo de obter os critérios de geometria e as propriedades dos materiais requeridos (ativos e passivos). São apresentadas as camadas de casamento acústico (membranas de filtragem) usadas na construção de transdutores para acoplamento em ar. Finalmente, neste capítulo, são descritos os modelos elétricos, matriciais, além do planejamento de uso do Método de Elementos Finitos (MEF ou FEM em inglês) de algum software comercial (COMSOL) na estimação do campo acústico, inserindo excitações elétricas harmônicas no elemento ativo.

No capítulo 3, descrevem-se os requisitos dos materiais ativos e passivos. No caso dos materiais passivos, serão avaliados os efeitos das propriedades das camadas na

transmissão de energia. Os critérios para a seleção do tipo e número ótimo de camadas são propostos, tendo em conta os requerimentos geométricos, estruturais e a disponibilidade de materiais. No caso do elemento ativo estuda-se o efeito de aumentar a largura de banda mediante a diminuição da densidade. Na análise numérica, apresentam-se os resultados dos parâmetros usados (entre eles, com e sem descolamento radial) tendo a configuração para o acoplamento em água como padrão de referência devido ao seu amplo estudo e facilidade de implementação.

No Capítulo 4, faz-se uma descrição das técnicas implementadas para a caracterização eletromecânica e acústica de cada um dos materiais (ativos e passivos). São apresentados os processos de construção de piezocompósitos, as montagens para a caracterização de um grupo de camadas comerciais de filtragem e a descrição do processo de síntese de aerogel (material que cumpre com os requisitos do projeto das camadas de acoplamento, mas que tem outras desvantagens) direto na superfície do elemento ativo. Finalmente, são descritos os processos de construção de três protótipos para acoplamento em ar com frequências próximas a 0,5 e 1 MHz.

No capítulo 5, são apresentados os resultados dos processos de caracterização anteriormente mencionados, junto com a comparação e discussão dos dados experimentais e teóricos usando algoritmos de ajuste implementados em MATLAB. Esse software também permite visualizar e comparar o campo acústico de alguns dos protótipos com os aparelhos comerciais. Os resultados do modelo de elementos finitos implementado em COMSOL são comparados com o campo acústico de algum dos protótipos. Além disso, são apresentadas as principais dificuldades da fabricação do protótipo com sua camada de acoplamento em Aerogel.

As conclusões são apresentadas, tendo-se em conta que a adição consecutiva de camadas densas e porosas permitem uma maior eficácia na transmissão de energia e que existe um limite para a construção de transdutores para acoplamento em ar dado pela frequência de operação, devido a pouca disponibilidade de materiais e a dificuldade no momento de uso. Finalmente, é proposto o modo de melhorar a síntese do aerogel usando reagentes parecidos (como, por exemplo, o reagente TMOS tetrametilortossilicato), e variações no processo de secagem supercrítica, o qual permitiria melhor desempenho no material, sendo as vantagens mais relevantes: redução de absorção de umidade no ar e diminuição da fragilidade.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, apresentam-se os conceitos físicos mais relevantes usados na descrição dos fenômenos acústicos e piezelétricos. A descrição da propagação acústica nos diferentes meios e os conceitos que regem o comportamento eletromecânico dos ressonadores piezocerâmicos serão usados para propor os parâmetros de desenho dos transdutores para acoplamento em ar.

2.1 Propagação de ondas acústicas

O fenômeno conhecido como propagação acústica está relacionado ao movimento da mudança local da densidade de um material elástico (sólido ou fluido) e uma velocidade específica (KINSLER, 2000). A mudança local da densidade resulta de uma perturbação mecânica ou elétrica (harmônica ou impulsiva). Existem basicamente dois modos de propagação longitudinal e transversal. As ondas longitudinais ocorrem quando a direção de movimento da mudança de densidade é a mesma que a direção de propagação da onda. Já para as ondas transversais os deslocamentos das partículas ocorrem perpendicularmente à direção de propagação da onda.

Uma onda acústica unidirecional, vibrando no modo longitudinal, pode ser descrita usando a segunda lei de Newton (eq.2.1), a lei de Hooke (eq.2.2) e resolvendo a equação diferencial obtida para um volume de controle como o apresentado na figura 2.

Segunda lei de Newton:

$$d\sigma_3 = \frac{\Delta F}{A_z} = \rho_o dz \frac{\partial^2 \xi_3}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

onde σ_3 é a tensão mecânica na direção de z (ou subíndice 3), F é força normal aplicada na secção A_z , ρ_o é a densidade inicial do meio da propagação, dz é o diferencial onde

Figura 2: Volume de controle.

Fonte: Fundamental of Ultrasonics Kino.

se muda a densidade e ξ_3 é o deslocamento das partículas na região dz na direção z . Lei de Hooke:

$$\frac{\sigma_3}{C_{33}} = \frac{\partial \xi_3}{\partial z} \quad (2.2)$$

onde, C_{33} é a constante elástica na direção 3, que se supõe constante, e $\frac{\partial \xi_3}{\partial z}$ é a deformação na direção z . Substituindo a equação 2.2 na equação 2.1, obtém-se a equação da onda unidimensional:

$$\frac{\partial^2 \xi_3}{\partial t^2} = \frac{C_{33}}{\rho_o} \frac{\partial^2 \xi_3}{\partial z^2} \quad (2.3)$$

A solução da equação da onda 2.3 pode ser expressada na forma:

$$\xi_3(z, t) = \xi_+(z - ct) + \xi_-(z + ct) \quad (2.4)$$

onde $c = \left(\frac{C_{33}}{\rho_o}\right)^{\frac{1}{2}}$ é a velocidade de propagação da onda, o termo $\xi_+(z - ct)$ representa as ondas que são movimentadas para frente (direção z), e o termo $\xi_-(z + ct)$, ondas que se propagam para trás (ENSMINGER, 2012). De modo similar, é possível obter as soluções da velocidade (eq. 2.5a) e da tensão mecânica (eq. 2.5b) das partículas do material.

$$v(z, t) = v_+(z - ct) + v_-(z + ct) \quad (2.5a)$$

$$\sigma(z, t) = \sigma_+(z - ct) + \sigma_-(z + ct) \quad (2.5b)$$

Conhecendo a velocidade de propagação c no meio, tem-se a seguinte relação entre

a frequência de operação f e o comprimento da onda λ .

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.6)$$

A partir do comprimento de onda λ , que é a distância alcançada em um ciclo completo de oscilação num dado meio, o número de onda k é calculado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \quad (2.7)$$

2.2 Impedância Acústica

Com as equações 2.5a e 2.5b é possível encontrar a relação entre a velocidade e a tensão mecânica a partir da equação 2.1. Reorganizando a equação 2.1:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \rho_o \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.8)$$

onde $v = \frac{\partial \xi_3}{\partial t}$ é a velocidade da partícula, fazendo a diferenciação parcial com relação às partes dos termos da solução da onda que vai para a frente ($z - ct$), para os casos do esforço e da velocidade:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{\partial \sigma}{\partial(z - ct)} \frac{\partial(z - ct)}{\partial z} = \frac{\partial \sigma}{\partial(z - ct)} \quad (2.9a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial(z - ct)} \frac{\partial(z - ct)}{\partial t} = -c \frac{\partial v}{\partial(z - ct)} \quad (2.9b)$$

Substituindo os resultados das equações 2.9a e 2.9b na equação 2.8 e igualando as funções derivada, obtém-se:

$$\sigma_+ = -\rho_o c v_+ \quad (2.10)$$

Definindo a impedância acústica específica Z_a como o produto entre a velocidade de propagação c do material e a densidade ρ_o , tem-se a seguinte relação entre a tensão

σ_+ e a velocidade da partícula v_+ .

$$Z_a = \rho_o c = -\frac{\sigma_+}{v_+} \quad (2.11)$$

Analogamente ao que foi desenvolvido para a onda que se propaga para frente, tem-se a seguinte relação para a onda que se propaga para trás:

$$Z_a = \rho_o c = \frac{\sigma_-}{v_-} \quad (2.12)$$

A impedância acústica é utilizada na determinação da intensidade e da amplitude da onda transmitida ou refletida numa interface entre dois meios. Dependendo do descasamento de impedância entre os dois meios, resulta numa baixa transmissão de energia através da interface, ou seja, numa maior reflexão da energia.

2.3 Reflexão e Transmissão

As ondas introduzidas em estruturas com descontinuidades são refletidas e transmitidas nas interfaces, processos nos quais a intensidade da onda diminui.

Figura 3: Propagação em a) dois meios b) três meios.

As figuras 3 (a) e (b) apresentam as pressões acústicas (P_i , P_r , P_t , etc) em incidência normal nas interfaces, respectivamente, com dois e três meios com impedâncias acústicas diferentes. As pressões P_i , P_r e P_t são, respectivamente, as expressões dos coeficientes de incidência, reflexão e transmissão e P_a e P_b são as pressões que se propagam no interior do meio 2 no caso de três meios.

A partir da solução harmônica da equação da onda, as velocidades e a pressão

incidente e refletida na figura 3a (dois meios) são dadas por:

$$v_i = v_+(z - c_1 t) = v_i e^{-jk_1(z - c_1 t)} \quad (2.13a)$$

$$v_r = v_-(z + c_1 t) = v_r e^{jk_1(z + c_1 t)} \quad (2.13b)$$

$$v_t = v_+(z - c_2 t) = v_t e^{-jk_2(z - c_2 t)} \quad (2.13c)$$

$$P_i = \sigma_+(z - c_1 t) = P_i e^{-jk_1(z - c_1 t)} \quad (2.13d)$$

$$P_r = \sigma_-(z + c_1 t) = P_r e^{jk_1(z + c_1 t)} \quad (2.13e)$$

$$P_t = \sigma_+(z - c_2 t) = P_t e^{-jk_2(z - c_2 t)} \quad (2.13f)$$

onde $k_1 = \frac{\omega}{c_1}$ e $k_2 = \frac{\omega}{c_2}$ são, respectivamente, o número da onda nos meios 1 e 2.

Igualando as tensões e as velocidades na interface ($z = 0$ da figura 3a) e cancelando o termo harmônico $e^{j\omega t}$ que aparece em ambos os lados das equações, têm-se:

$$P_i e^{-j0} + P_r e^{j0} = P_t e^{-j0} \quad (2.14a)$$

$$v_i e^{-j0} + v_r e^{j0} = v_t e^{-j0} \quad (2.14b)$$

As equações 2.14a e 2.14b representam a continuidade da pressão e da velocidade das partículas na interface. Usando as equações 2.11 e 2.12, que podem ser aplicadas a cada um dos termos da equação 2.14b, e dividindo por P_i as equações 2.14a e 2.14b, tendo em conta que $e^{\pm j0} = 1$, as expressões resultantes são:

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{P_i}{P_i} + \frac{P_r}{P_i} \quad (2.15a)$$

$$-\frac{P_t}{Z_2 P_i} = -\frac{P_i}{Z_1 P_i} + \frac{P_r}{Z_1 P_i} \quad (2.15b)$$

onde as relações $\frac{P_r}{P_i}$ e $\frac{P_t}{P_i}$ representam os coeficientes de reflexão (R_{12}) e transmissão (T_{12}), respectivamente. Resolvendo o sistema apresentado para (R_{12}) e (T_{12}), obtêm-

se:

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.16a)$$

$$T_{12} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.16b)$$

Para a configuração de três meios apresentado na figura 3b, as condições de contorno nas interfaces em $z = 0$ e $z = L$, com tempo $t = 0$ (arbitrário, mas a solução é válida para qualquer t) resultam no seguinte sistema de equações:

$$P_i e^{-j0} + P_r e^{j0} = P_a e^{-j0} + P_b e^{j0} \quad (2.17a)$$

$$Z_2 (-P_i e^{-j0} + P_r e^{j0}) = Z_1 (-P_a e^{-j0} + P_b e^{j0}) \quad (2.17b)$$

$$P_a e^{-jk_2 L} + P_b e^{jk_2 L} = P_t e^{-jk_3 L} \quad (2.17c)$$

$$Z_3 (-P_a e^{-jk_2 L} + P_b e^{jk_2 L}) = Z_2 (-P_t e^{-jk_3 L}) \quad (2.17d)$$

A partir dessas equações é possível obter a relação entre as amplitudes de pressão na entrada (P_i) e na saída (P_t):

$$\frac{P_i}{P_t} = \frac{4(Z_3 Z_2) e^{jLk_3}}{[e^{jLk_2} - e^{-jLk_2}] (Z_2^2 + Z_1 Z_3) + [e^{jLk_2} + e^{-jLk_2}] (Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3)} \quad (2.18)$$

Lembrando que em geral:

$$\text{sen}(Lk_2) = \frac{e^{jLk_2} - e^{-jLk_2}}{2j} \quad (2.19a)$$

$$\text{cos}(Lk_2) = \frac{e^{jLk_2} + e^{-jLk_2}}{2} \quad (2.19b)$$

Desse modo, obtêm-se:

$$\frac{P_i}{P_t} = \frac{2(Z_3 Z_2) e^{jLk_3}}{\text{cos}(Lk_2)(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3) + j \text{sen}(Lk_2)(Z_2^2 + Z_1 Z_3)} \quad (2.20)$$

Tendo em conta a definição da intensidade, ou seja, a quantidade de fluxo de ener-

gia da onda harmônica por unidade de área, tem-se:

$$I = \frac{|A|^2}{2Z} \quad (2.21)$$

onde A é a magnitude de pressão das ondas incidente, refletida ou transmitida, como no caso da equação 2.18 (P_t e P_i). É preciso lembrar que a magnitude de uma função periódica não é dependente da fase. Logo, para a simplificação da equação 2.20 a fase foi rejeitada, considerando $e^{jLk_3} = 1$ para $Lk_3 = 0$. Logo, a intensidade transmitida T_I entre os meios 1 e 3 (fig. 3b) é obtida da relação das intensidades incidente ($I_i = \frac{P_i^2}{2Z_1}$) e transmitida ($I_t = \frac{P_t^2}{2Z_3}$), sendo dada por:

$$T_I = \left| \frac{P_t}{P_i} \right|^2 \frac{Z_3}{Z_1} = \left| \frac{2(Z_3 Z_2)}{\cos(Lk_2)(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3) + j \sin(Lk_2)(Z_2^2 + Z_1 Z_3)} \right|^2 \frac{Z_3}{Z_1} \quad (2.22)$$

A equação 2.22 permite estimar a quantidade de energia transmitida entre 3 meios de diferente densidade. Essa equação é simplificada quando $Z_1 = Z_3$:

$$T_I = \frac{4}{|2\cos(Lk_2) + j \sin(Lk_2) \left(\frac{Z_1^2 + Z_2^2}{Z_1 Z_2} \right)|^2} \quad (2.23)$$

Neste trabalho, a configuração de três meios é usada para o projeto e construção do transdutor sendo empregada na caracterização das camadas de acoplamento. Considera-se a atenuação no meio 2 quando k_2 for um número complexo.

2.4 Atenuação

A atenuação causa o decaimento da amplitude da onda que se propaga através do meio. Esse decaimento pode ser devido às descontinuidades, às transformações entre modos de propagação longitudinal e transversal e aos efeitos viscoelásticos do material. Mesmo para meios isotrópicos e homogêneos, a amplitude das ondas mecânicas também decai gradualmente a medida que a onda propaga-se nas diferentes direções. Isso ocorre porque as ondas propagam-se omnidirecionalmente segundo o princípio de Huygens. A atenuação, neste caso, é do tipo geométrico (fig 4) pela redistribuição da energia entre os infinitos pontos ressonantes omnidirecionais.

A atenuação (α) devido à absorção acústica é descrita pela equação 2.24 (ENSMIN-

Figura 4: Atenuação geométrica.

GER, 2012); a qual representa uma queda na amplitude de uma onda plana propagando-se na direção z .

$$A_z = A_o e^{-\alpha z} \quad (2.24)$$

onde A_o é o valor inicial ou referência da amplitude da onda em $z = 0$. Logo, o coeficiente de atenuação α pode ser determinado por:

$$\alpha = -\frac{1}{z} \ln \left(\frac{A_z}{A_o} \right) \quad (2.25)$$

A unidade da atenuação é $\frac{Np}{m}$, a qual também pode ser apresentada em atenuação normalizada pelo comprimento de onda, ou seja, o produto entre a atenuação e o comprimento de onda $\alpha_\lambda = \alpha \cdot \lambda$: [Np] (ÁLVAREZ-ARENAS, 2004).

Nos modelos de propagação de ondas acústicas em sólidos, a atenuação é geralmente desprezada. Porém, no ar ou em materiais altamente porosos, a atenuação se torna fundamental e não pode ser desprezada. Em materiais porosos, a atenuação é devido principalmente as reverberações e dissipações que geram às estruturas internas.

Neste trabalho, a seleção de materiais (camadas porosas), usados na construção de transdutores de alta frequência para acoplamento em ar, é feita por criterios baseados na capacidade atenuante desses materiais, bem como, sua impedância acústica e espessura (GÓMEZ; GONZALEZ; MONTERO, 2002).

Inserindo o efeito da atenuação na avaliação da pressão e a velocidade na configu-

ração para 3 meios (fig. 3b) obtém-se:

$$P_i e^{-j0-\alpha_1 0} + P_r e^{j0+\alpha_1 0} = P_a e^{-j0-\alpha_2 0} + P_b e^{j0+\alpha_2 0} \quad (2.26a)$$

$$Z_2 (-P_i e^{-j0-\alpha_1 0} + P_r e^{j0+\alpha_1 0}) = Z_1 (-P_a e^{-j0-\alpha_2 0} + P_b e^{j0+\alpha_2 0}) \quad (2.26b)$$

$$P_a e^{-jk_2 L - \alpha_2 L} + P_b e^{jk_2 L + \alpha_2 L} = P_t e^{-jk_3 L} \quad (2.26c)$$

$$Z_3 (-P_a e^{-jk_2 L - \alpha_2 L} + P_b e^{jk_2 L + \alpha_2 L}) = Z_2 (-P_t e^{-jk_3 L}) \quad (2.26d)$$

que ao resolver novamente para $\frac{P_t}{P_i}$, considerando as seguintes relações:

$$e^{-jk_2 L - \alpha_2 L} = e^{-jL(k_2 - j\alpha_2)} = e^{-jL\widehat{k}_2} \quad (2.27a)$$

$$e^{jk_2 L + \alpha_2 L} = e^{jL(k_2 - j\alpha_2)} = e^{jL\widehat{k}_2} \quad (2.27b)$$

onde o número de onda no meio 2, $\widehat{k}_2 = k_2 - j\alpha_2$, é considerado complexo, obtém-se a transmissão de energia:

$$T_I = \left| \frac{2(Z_3 Z_2)}{\cos(L\widehat{k}_2)(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3) + j \sin(L\widehat{k}_2)(Z_2^2 + Z_1 Z_3)} \right|^2 \frac{Z_3}{Z_1} \quad (2.28)$$

A expressão 2.28 pode ser usada no cálculo do coeficiente de transmissão em intensidade, avaliando à atenuação do meio 2. É o modelo que descreve a transmissão de energia em três meios com diferentes densidades (por exemplo, elemento ativo, camada de acoplamento e ar).

2.5 Camadas passivas

Os transdutores de ultrassom são constituídos principalmente por um elemento ativo e um conjunto de componentes passivos que alteram a forma e melhoram a transmissão e recepção das ondas. Os principais elementos passivos do transdutor são a camada de retaguarda (*backing*) e as camadas de acoplamento (*matching layers*).

A camada de retaguarda tem a finalidade de aumentar a banda de frequência do transdutor. Basicamente, é um material de densidade similar ao elemento ativo, mas com amortecimento elevado (alta taxa de atenuação na resposta mecânica e elétrica do

sistema). Os sistemas dinâmicos, após perturbações elétricas ou mecânicas, precisam de um tempo para chegar ao estado inicial ou de equilíbrio, evitando interferências com outro sinal. O *backing* reduz significativamente esse tempo absorvendo e atenuando a energia acústica e fazendo uma contraposição ao movimento do ressonador pela sua grande inércia.

A diferença de impedância acústica entre o elemento ativo e o meio de propagação reduz a transmissão de energia acústica entre eles. A redução é significativa quando a diferença é mais do que uma ordem de grandeza, como no caso PZT-ar. Então, é preciso usar camadas de casamento que comportam-se como molas de transição mecânica entre esses meios. Utilizam-se camadas de acoplamento acústico na frente do elemento ativo para casar as impedâncias do piezocerâmico e do meio externo. Cada camada tem espessura $\frac{\lambda}{4}$ com um material que tem uma impedância acústica específica Z_2 próxima a média geométrica entre as impedâncias dos materiais vizinhos (Z_1 e Z_3), como será apresentado no capítulo 3. Dessa maneira, as camadas de acoplamento conseguem maximizar a quantidade de energia transferida do elemento ativo para o meio de propagação. No caso da emissão para o ar, as mesmas camadas também podem modificar (aumentar) a banda de resposta do sistema.

2.5.1 Camadas de acoplamento para emissão em ar

Para as camadas de acoplamento, como comentado anteriormente, precisa-se de materiais com impedância acústica com valor igual a média geométrica das impedâncias dos meios. No caso, para acoplamento entre a cerâmica e o ar, deve-se ter uma impedância acústica de uma ordem de grandeza menor que a da água. Isso implica um alto grau de porosidade que resulta em uma elevada atenuação do material (KELLY; HAYWARD; ÁLVAREZ-ARENAS, 2004). Esses materiais apresentam dissipações viscoelásticas (MHz) com valores de atenuação maiores que $1000 \frac{Np}{m}$ (ÁLVAREZ-ARENAS, 2004), correspondendo a uma queda na amplitude do sinal de 65% para um material com espessura de 1 mm (sem contar com outros tipos de perdas como as reflexões internas). Este trabalho inclui a caracterização de alguns desses materiais, considerando o grau de atenuação como um dos critérios na escolha das camadas de acoplamento.

Embora não exista um critério para o nível de atenuação certo ou máximo útil nas camadas de acoplamento, é importante saber qual é o alcance e o efeito dessas camadas, disponíveis comercialmente, em piezocerâmicos de alta frequência.

2.6 Materiais piezelétricos

Além de descrever um comportamento mecânico, o elemento ativo emula um comportamento elétrico, ou seja, um circuito elétrico com resistores, capacitores e indutores ligados em série ou paralelo, o qual muda sua resposta nas diversas frequências de excitação.

Então, uma maneira rápida e eficaz de visualizar o desempenho mecânico do piezocerâmico é por meio da medição da variação de seu comportamento elétrico (por exemplo impedância elétrica Z_e) numa faixa de frequência específica.

Em geral, quando um sistema elétrico entra em ressonância, sua Z_e diminui, o que permite um incremento no fluxo de elétrons. De modo contrário, quando Z_e do sistema é máxima, os fluxos e deformações são quase zero. A descrição da relação entre deformações mecânicas e deslocamentos elétricos é chamada piezeletricidade. Esse fenômeno pode ser descrito em função da geometria do sistema, junto com suas propriedades mecânicas e elétricas, além do fator de acoplamento eletromecânico em modo espessura k_e . O parâmetro k_e permite uma quantificação aproximada da eficiência da conversão dos diferentes tipos de energia do sistema (mecânica e elétrica).

O fenômeno conhecido como piezeletricidade foi incluído no conceito de energia livre G (Eq 2.29), que relaciona energia interna U , deformação τ , esforço σ , deslocamento elétrico D , campo elétrico E , temperatura T e entropia S de um sistema (MELLINGER, 2003).

$$G = U - \sigma_i \tau_i - E_m D_m - TS \quad (2.29)$$

Neste trabalho, o elemento ativo empregado é o titanato zirconato de chumbo (PZT), que permite que perturbações mecânicas e elétricas gerem deslocamentos elétricos ou mecânicos, respectivamente. É importante lembrar quando as variações de T , S e U tendem a ser nulas, a equação faz referência a um sistema adiabático (quer dizer, sem fluxo de calor nas bordas). Em geral, um sistema com essas condições, a energia livre de Gibbs G torna-se a variável conhecida como entalpia H .

$$H = U - \sigma_i \tau_i - E_m D_m \quad (2.30)$$

onde os índices i representa os componentes de um tensor simétrico com 6 variáveis

independentes ($i = 1, 2, 3, \dots, 6$), enquanto o índice m indica a orientação espacial ($m = 1, 2$ e 3). É possível definir τ e D como variáveis independentes e demonstrar que H é uma função conservadora (equações 2.31-2.35).

$$\frac{\partial H}{\partial D_m} = - \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial D_m} \right]_{\tau_i} \tau_i - \left[\frac{\partial E_m}{\partial D_n} \right]_{\tau_i} D_m - E_m \quad (2.31)$$

O subscrito τ_i indica que a variável permanece constante.

$$\frac{\partial^2 H}{\partial \tau_i \partial D_m} = - \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial D_m} \right]_{\tau_i} - \left[\frac{\partial E_m}{\partial \tau_i} \right]_{D_m} \quad (2.32)$$

da mesma forma:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau_i} = - \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau_j} \right]_{D_m} \tau_j - \sigma_i - \left[\frac{\partial E_m}{\partial \tau_i} \right]_{D_m} D_m \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial D_m \partial \tau_i} = - \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial D_m} \right]_{\tau_i} - \left[\frac{\partial E_m}{\partial \tau_i} \right]_{D_m} \quad (2.34)$$

Logo:

$$Q = \frac{\partial^2 H}{\partial D_m \partial \tau_i} = \frac{\partial^2 H}{\partial \tau_i \partial D_m} \quad (2.35)$$

onde Q denota uma constante que indica que H é uma equação diferencial exata, cuja solução é uma função conservadora como foi inicialmente indicado. Redefinido os membros das equações anteriores, obtém-se:

$$- \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial D_m} \right]_{\tau_i} = \left[\frac{\partial E_m}{\partial \tau_i} \right]_{D_m} = h_{im} \quad (2.36a)$$

$$\left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau_j} \right]_{D_m} = C_{ij}^D \quad (2.36b)$$

$$\left[\frac{\partial E_m}{\partial D_n} \right]_{\tau_i} = \beta_{mn}^\tau \quad (2.36c)$$

onde os coeficientes das equações h_{im} , C_{ij}^D e β_{mn}^τ são chamados coeficiente piezelétrico, constante elástica e permissividade dielétrica, respectivamente (MELLINGER, 2003).

Então, é possível propor duas equações linearmente independentes para que:

$$\sigma_i = f(\tau_i, D_m) \quad (2.37a)$$

$$E_m = f(\tau_i, D_m) \quad (2.37b)$$

onde sua variação total seria:

$$d\sigma_i = \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau_i} \right]_{D_m} d\tau_j + \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial D_m} \right]_{\tau_j} dD_m \quad (2.38a)$$

$$dE_m = \left[\frac{\partial E_m}{\partial \tau_i} \right]_{D_m} d\tau_j + \left[\frac{\partial E_m}{\partial D_m} \right]_{\tau_i} dD_m \quad (2.38b)$$

Ao substituir as equações 2.36a, 2.36b e 2.36c nas equações 2.38a e 2.38b e integrar, obtêm-se as equações piezelétricas constitutivas:

$$\sigma_i = C_{ij}^D \tau_j - (h^t)_{im} D_m \quad (2.39a)$$

$$E_m = -h_{mj} \tau_j + \beta_{mn}^\tau D_m \quad (2.39b)$$

onde $(h^t)_{im}$ é a transposta do coeficiente piezelétrico h_{mj} .

Além disso, a partir da equação 2.29 também pode-se afirmar que a energia interna (constante) de um sistema é definida (MELLINGER, 2003):

$$U = \frac{1}{2} \sigma_i \tau_i + \frac{1}{2} E_m D_m \quad (2.40)$$

substituindo as equações 2.39a e 2.39b na 2.40 e reorganizando, obtém-se:

$$U = \frac{1}{2} C_{ij}^D \tau_j^2 + h_{im} \tau_j D_m + \frac{1}{2} \beta_{mn}^\tau D_m^2 \quad (2.41)$$

onde o primeiro termo denota as interações mecânicas, o segundo, as interações eletromecânicas e o último só as interações elétricas. Dessa forma, define-se o fator de acoplamento eletromecânico no modo espessura k_t , que é a ponderação eletromecânica entre os componentes elétricos e mecânicos independentemente, representando

um número adimensional.

$$k_t^2 = \frac{h_{im}^2}{C_{ij}^D \beta_{mn}^T} \quad (2.42)$$

Para descrever a evolução de σ e E com o tempo, usa-se um equivalente da solução da equação da onda (eq.2.4). Assim, a solução da equação de onda, para uma vibração plana propagando-se na direção z , é dada por:

$$\xi_{(z,t)} = \left[A \operatorname{sen} \left(\frac{\omega z}{v_3} \right) + B \cos \left(\frac{\omega z}{v_3} \right) \right] e^{j\omega t} \quad (2.43)$$

Onde ξ é o deslocamento, A e B são constantes associadas às condições de contorno (fig.5), ω é a frequência angular, j é a unidade imaginária, t é o tempo, z é a coordenada espacial (índice 3 na figura 5) e v_3 indica a velocidade de propagação no material em alguma direção específica dada pela expressão 2.44:

$$v_3 = \left(\frac{C_{33}^D}{\rho_o} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.44)$$

É preciso lembrar que o coeficiente C_{33}^D é a constante elástica dos materiais piezocerâmicos, o qual inclui o efeito do incremento da velocidade pelo efeito elastoelétrico. Na prática é usado para caracterização de piezocerâmicos de alta frequência sendo simplesmente C_{33} para cerâmicas operando com frequências menores do que 5 MHz. O deslocamento ξ pode estar relacionado à deformação τ , como mostrado na equação 2.45.

$$\tau_3 = \frac{\partial \xi_3}{\partial z} \quad (2.45)$$

Logo:

$$\tau_3 = \left[\frac{\omega}{v_3} A \cos \left(\frac{\omega z}{v_3} \right) - \frac{\omega}{v_3} B \operatorname{sen} \left(\frac{\omega z}{v_3} \right) \right] e^{j\omega t} \quad (2.46)$$

Por outro lado, é possível propor D_m como uma excitação periódica dependente do tempo (Eq. 2.47), se o piezocerâmico está livre de cargas elétricas no seu interior, ou seja, $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$ (Lei de Gauss). Nesse caso, o deslocamento elétrico dentro do elemento ativo é invariável na direção 3. A interação da piezocerâmica com campos elétricos o

pressão mecânica gera como resultado um fluxo de corrente na área ativa da cerâmica piezelétrica (A_e), quer dizer $I_3 = A_e \frac{\partial D_3}{\partial t}$:

$$D_3 = D_o e^{j\omega t}. \quad (2.47)$$

Ao substituir as equações 2.47 e 2.46 na equação 2.39a, usando as condições de contorno mostradas na figura 5 (PZT sem carga acústica nas bordas, cuja deformação mais relevante ocorre na direção 3 (z), obtém-se para $z = 0$:

Figura 5: Condições de contorno do elemento ativo em modo espessura (seção transversal A_e , e Força=0).

$$A = \frac{h_{33} D_o}{\frac{\omega}{v_3} C_{33}^D}, \quad (2.48)$$

e para o caso em que $z=h$, obtém-se:

$$B = - \left[\frac{h_{33} D_o}{\frac{\omega}{v_3} C_{33}^D} \right] \tan \left(\frac{\omega h}{2v_3} \right), \quad (2.49)$$

Por outro lado, a impedância elétrica pode ser estimada da seguinte forma:

$$Z = \frac{V_3}{I_3} = \frac{\int E_3 dz}{A_e \frac{\partial D_3}{\partial t}}, \quad (2.50)$$

onde V_3 é a diferença de tensão elétrica entre as posições $z = 0$ e $z = h$, que corresponde à integral do campo elétrico (E_3) através da espessura h (direção 3) da placa de PZT e I_3 é a corrente elétrica que flui na mesma direção (fig.5) ou a variação de D_3 no tempo através da secção transversal de área A_e . Ao substituir os valores de A e B na equação 2.46 e esta em 2.39b, obtém-se:

$$E_3 = - \left[\frac{h_{33} D_o}{c_{33}^D} \right] \left[\cos\left(\frac{\omega z}{v_3}\right) + \tan\left(\frac{\omega h}{v_3}\right) \sin\left(\frac{\omega z}{v_3}\right) \right] e^{j\omega t} + [\beta_{33}^\tau D_o] e^{j\omega t}, \quad (2.51)$$

Integrando em relação a z (entre 0 e h), obtém-se:

$$V_3 = \left(\left[\frac{-h_{33}^2 D_o}{\frac{\omega}{v_3} c_{33}^D} \right] \left[\sin\left(\frac{\omega h}{v_3}\right) - \tan\left(\frac{\omega h}{2v_3}\right) \left(\cos\left(\frac{\omega h}{v_3}\right) - 1 \right) \right] + \beta_{33}^\tau D_o \right) e^{j\omega t} \quad (2.52)$$

Além disso:

$$I_3 = j\omega A_e D_o e^{j\omega t} \quad (2.53)$$

Ao substituir e reorganizar 2.52 e 2.53, tendo em conta que $\frac{\omega h}{v_3} = \theta$, obtém-se a impedância elétrica Z_e em função da geometria e dos parâmetros propostos para o PZT (Eq. 2.54).

$$Z_e = - \frac{h_{33}^2}{A_e C_{33}^D \frac{\omega}{v_3} j\omega} 2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{\beta_{33}^\tau h}{j\omega A_e} \quad (2.54)$$

Ao reordenar a equação 2.54 e combinar h_{33} , C_{33}^D e β_{33}^τ (fator de acoplamento eletromecânico k_t), finalmente obtém-se:

$$Z_e = \frac{\beta_{33}^\tau h}{j\omega A_e} \left(1 - k_t^2 \frac{\tan\theta/2}{\theta/2} \right) \quad (2.55)$$

No modelo deve ser incluído o efeito dos atrasos ou das perdas nas conversões entre a energia elétrica e a mecânica. Segundo Holland (1967), esses atrasos ou perdas são interpretados como as componentes real e imaginária (eq. 2.56) do parâmetro complexo piezocerâmico φ (parâmetro elétrico ou mecânico em geral). Logo, o ângulo

Ψ e o argumento do parâmetro complexo φ são dados por:

$$\varphi = \varphi^{Real} + j\varphi^{Imag} \quad (2.56)$$

$$\tan(\Psi) = \frac{\varphi^{Imag}}{\varphi^{Real}} \quad (2.57)$$

O que permite reescrever a equação:

$$\varphi = \varphi^{Real} (1 + j\tan\Psi) \quad (2.58)$$

Efetuada a equação 2.58, os parâmetros h_{33} , C_{33}^D e β_{33}^τ tornam-se (MELLINGER, 2003):

$$h_{33} = h_{33}^{Real} (1 + j\tan\Psi_h) \quad (2.59a)$$

$$C_{33}^D = C_{33}^{D\,Real} (1 + j\tan\Psi_c) \quad (2.59b)$$

$$\beta_{33}^\tau = \beta_{33}^{\tau\,Real} (1 + j\tan\Psi_\beta) \quad (2.59c)$$

Com a equação 2.55 é possível a descrição do elemento ativo (cerâmica ou piezocompósito) no caso em que as cargas acústicas (elementos passivos) nos eletrodos sejam zero ou muito próxima de zero ($\sigma = 0$). Porém, todas as aplicações dos transdutores piezocerâmicos precisam de uma ou mais camadas para o acoplamento no meio de propagação (aço, água ou ar). Desse modo, foi usado neste trabalho, o modelo que insere os efeitos dos elementos passivos (camadas de acoplamento e *backing*) sobre o elemento ativo.

2.7 Modelo matricial do transdutor

A formulação matricial do transdutor é similar à apresentada para o modelo do comportamento elétrico com duas modificações importantes (LAMBERTI; GIUA; PAPPALARDO, 1987). Primeiramente um novo par de equações constitutivas é considerada. As variáveis dependentes serão, neste caso, σ (tensão mecânica) e D (deslocamento elétrico) e as variáveis independentes serão τ (deformação mecânica) e E (campo elé-

trico). A variação total dessas variáveis serão:

$$d\sigma_i = \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau_j} \right]_{E_m} d\tau_j + \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial E_m} \right]_{\tau_j} dE_m \quad (2.60a)$$

$$dD_m = \left[\frac{\partial D_m}{\partial \tau_i} \right]_{E_n} d\tau_i + \left[\frac{\partial D_m}{\partial E_n} \right]_{\tau_i} dE_n \quad (2.60b)$$

Deve-se lembrar que o subíndice do colchete indica a variável que permanece constante. Logo, a análise do campo conservativo (entalpia) vai gerar os seguintes coeficientes:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau_i} = \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau_j} \right]_{E_m} \tau_j + \sigma_i + \left[\frac{\partial D_m}{\partial \tau_i} \right]_{E_m} E_m \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial E_m \partial \tau_i} = \left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial E_m} \right]_{\tau_i} + \left[\frac{\partial D_m}{\partial \tau_i} \right]_{E_m} \quad (2.62)$$

onde $\left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau_i} \right]_{E_m} = C_{ij}^E$ é o módulo elástico a campo elétrico constante, $\left[\frac{\partial \sigma_i}{\partial E_m} \right]_{\tau_j} = e_{im}^t$ é a constante piezelétrica junto com sua transposta $\left[\frac{\partial D_m}{\partial \tau_i} \right]_{E_n} = e_{im}$ e $\left[\frac{\partial D_m}{\partial E_n} \right]_{\tau_i} = \varepsilon_{mn}^\tau$ é a constante dielétrica com deformação constante. Desse modo, obtém-se as novas equações constitutivas para este modelo:

$$\sigma_i = C_{ij}^E \tau_j - (e^t)_{im} E_m \quad (2.63a)$$

$$D_m = e_{mj} \tau_j + \varepsilon_{mn}^\tau E_m \quad (2.63b)$$

É importante ressaltar a diferença entre C_{ij}^E deste modelo e C_{ij}^D obtido no modelo sem cargas acústicas. A relação entre esses módulos elásticos é obtida deixando D constante na direção 3 na equação 2.60b (ou seja, $\frac{\partial D}{\partial z} = 0$) e usando o resultado na

equação 2.63b avaliado na mesma direção:

$$\frac{\partial D_m}{\partial z} = 0 = \left[\frac{\partial D_m}{\partial \tau_i} \right]_{E_n} \frac{\partial \tau_j}{\partial z} + \left[\frac{\partial D_m}{\partial E_n} \right]_{\tau_i} \frac{\partial E_m}{\partial z} \quad (2.64a)$$

$$E_3 = -\frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^{\tau}} \tau_3 \quad (2.64b)$$

$$\frac{\partial \sigma_3}{\partial z} = C_{33}^E \left(1 + \frac{e_{33}^2}{C_{33}^E \epsilon_{33}^{\tau}} \right) \frac{\partial \tau_3}{\partial z} \quad (2.64c)$$

O termo $\frac{e_{33}^2}{C_{33}^E \epsilon_{33}^{\tau}}$ é análogo ao fator de acoplamento k_t proposto na equação 2.42, assim sendo:

$$\frac{\partial \sigma_3}{\partial z} = C_{33}^E (1 + k^2) \frac{\partial \tau_3}{\partial z} \quad (2.65)$$

A equação 2.65 indica que o segundo modelo faz distinção entre material piezelétrico e material passivo. Para o modelo matricial a velocidade de propagação $v_3 = \left(\frac{C_{33}^E (1+k^2)}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}}$ depende de k o que implica um incremento da velocidade de propagação pelo efeito elásto-elétrico (LAMBERTI; GIUA; PAPPALARDO, 1987) nos piezocerâmicos. Isso faz que $C_{33}^D = C_{33}^E (1 + k^2)$. Já para o material passivo $v_3 = \frac{C_{33}}{\rho_0}$, nesse caso, $k = 0$.

Usando as equações 2.63a, 2.63b com $\left(\frac{\partial D}{\partial z} = 0 \right)$ na direção 3 e lembrando a equação 2.46 junto com $\tau_3 = \frac{\partial \xi_3}{\partial z}$, a segunda mudança que deve ser considerada em relação às novas condições de contorno no piezocerâmico (fig. 6a) para o cálculo dos coeficientes A e B e tensões mecânicas nos eletrodos devido à adição de elementos passivos (camadas de acoplamento e *backing*).

É possível obter as equações 2.66a, 2.66b e 2.66c que representam um sistema de três portas: uma elétrica (como o caso da impedância elétrica apresentada na seção 2.6) e duas portas mecânicas (fig. 6a). Essas portas representam as cargas acústicas dos elementos passivos sobre as faces do elemento ativo, bem como a excitação ou

Figura 6: Esquemas do modelo matricial.

(a) Condições de contorno e configuração três portas

(b) Casos: 1) Com *backing* e cargas acústicas 2) sem *backing* e sem cargas acústicas

recepção do sinal elétrico.

$$V = \frac{e_{33}}{j\omega\epsilon_{33}^r}v_1 + \frac{e_{33}}{j\omega\epsilon_{33}^r}v_2 + \frac{1}{j\omega C_o}I \quad (2.66a)$$

$$F_1 = \frac{Z}{j \tan kz}v_1 + \frac{Z}{j \sin kz}v_2 + \frac{e_{33}}{j\omega\epsilon_{33}^r}I \quad (2.66b)$$

$$F_2 = \frac{Z}{j \sin kz}v_1 + \frac{Z}{j \tan kz}v_2 + \frac{e_{33}}{j\omega\epsilon_{33}^r}I \quad (2.66c)$$

onde $C_o = \frac{\epsilon_{33}^r A_e}{z}$ é a capacitância e $Z = \rho c A_e$ é a impedância acústica do meio piezelétrico. É possível reduzir o sistema de equações apresentado em 2.66 a duas expressões, considerando $F_1 = -v_1 Z_b$ o que gera a equação do *backing* em contato com a cerâmica 2.67 (fig.6b com *backing* e com cargas acústicas):

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

considerando:

$$A_{11} = \frac{\varepsilon_{33}^T(\cos kz + j\zeta \sin kz)}{e_{33}C_o(\cos kz - 1 + j\zeta \sin kz)} - \frac{e_{33} \sin kz}{Zw\varepsilon_{33}^T(\cos kz - 1 + j\zeta \sin kz)} \quad (2.68a)$$

$$A_{12} = \frac{e_{33}(2 \cos kz - 2 + j\zeta \sin kz)}{jw\varepsilon_{33}^T(\cos kz - 1 + j\zeta \sin kz)} - \frac{\varepsilon_{33}^TZ(\zeta \cos kz + j \sin kz)}{C_o e_{33}(\cos kz - 1 + j\zeta \sin kz)} \quad (2.68b)$$

$$A_{21} = \frac{jw\varepsilon_{33}^T(\cos kz + j\zeta \sin kz)}{e_{33}(\cos kz - 1 + j\zeta \sin kz)} \quad (2.68c)$$

$$A_{22} = -\frac{jw\varepsilon_{33}^TZ(\cos kz + j\zeta \sin kz)}{e_{33}(\cos kz - 1 + j\zeta \sin kz)} \quad (2.68d)$$

onde ζ é relação entre a impedância acústica do *backing* e da cerâmica, ou seja, $\frac{Z_b}{Z}$. Da equação 2.67, considerando $F_2 = 0$ e $Z_b = 0$, o modelo converge ao comportamento de uma porta elétrica (fig. 6b sem *backing* e sem cargas acústicas) ($Z = \frac{V}{I}$), explicado na seção 2.6.

Ao usar apenas a equação 2.63a sobre uma camada passiva (pelo fato de não haver flutuações ou campos elétricos $D=E=0$), obtém-se um sistema com uma expressão similar à equação 2.67, a qual relaciona as forças e velocidades nas superfícies emissoras com a impedância acústica da camada (Z_c) e sua espessura (z).

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kz & jZ_m \sin kz \\ \frac{j \sin kz}{Z_m} & \cos kz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ -v_2 \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

onde $Z_m = \rho_m c_m A_e$. No caso de pleno contato entre as interfaces, é possível igualar F_2 e v_2 da equação 2.67 com F_1 e v_1 da equação 2.69 e, assim, para n camadas sucessivas:

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & -A_{12} \\ A_{21} & -A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos kz & jZ_m \sin kz \\ \frac{j \sin kz}{Z_m} & \cos kz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ -v_2 \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

o que pode ser simplificado nas equações 2.71:

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & -A_{12} \\ A_{21} & -A_{22} \end{bmatrix} [M_1][M_2]...[M_n] \begin{bmatrix} F_2 \\ -v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

onde $Z_l = \rho_l c_l A_e$ é a impedância acústica do meio de propagação para uma área A_e de emissão. Com esta relação, é possível obter a função de transferência entre as variáveis F , V e I nas diferentes configurações do transdutor: emissão, recepção e pulso-eco

(eqs. 2.72a, 2.72b e 2.72c).

$$FTE = \frac{F_E}{V_E} = \frac{Z_l}{AZ_l + B + R_E(CZ_l + D)} \quad (2.72a)$$

$$FTR = \frac{F_R}{V_R} = \frac{R_R}{DR_R + B} \quad (2.72b)$$

$$FTER = \frac{V_R}{V_E} = \frac{Z_l}{AZ_l + B + R_E(CZ_l + D)} \frac{2R_R}{AZ_l + B + R_R(CZ_l + D)} \quad (2.72c)$$

$$Z_e = \frac{V}{I} = \frac{AZ_l + B}{CZ_l + D} \quad (2.72d)$$

onde FTE, FTR, FTER e Z_e são as funções de transferência em modo emissão, recepção, emissão-recepção e a impedância elétrica, respectivamente, sendo R_R e R_E as resistências elétricas dos circuitos na emissão e recepção, respectivamente. A equação 2.72c é de grande utilidade para a estimativa detalhada do desempenho dos elementos do transdutor, ou seja, as perdas nos processos de emissão e recepção. Tais perdas são chamadas na literatura *two way insertion loss* (LAMBERTI; GIUA; PAPPALARDO, 1987). Neste modelo não são inseridos os atrasos ou perdas para cada um dos parâmetros, como foi feito no modelo anterior, mas pode ser inserido o número de onda complexo.

2.8 Elementos Finitos

Os modelos analíticos brindam uma descrição do comportamento acústico (Rayleigh, 1945) e eletromecânico (modelo matricial) do transdutor. Porém, esses modelos são tratados de modo independente e só é possível fazer uma relação entre eles em condições específicas (por exemplo, deslocamento unidirecional e materiais homogêneos) cujos resultados têm divergências significativas em relação aos dados experimentais. Assim, a descrição certa dos fenômenos acústicos, estruturais e elétricos precisa de uma análise multifísica numérica.

Assim sendo, os métodos numéricos permitem desenvolver os equacionamentos apresentados nas seções anteriores em elementos diferenciais em todas as direções espaciais, permitindo a visualização de todos os padrões de resposta dos fenômenos elétricos, mecânicos e acústicos. Um estudo detalhado para resposta de materiais piezoeletricos é apresentado em (KOCBACH, 2000).

Neste trabalho, o pacote de elementos finitos do COMSOL foi usado, permitindo

avaliar os fenômenos piezelétricos, estruturais e acústicos. A variável de saída foi o campo acústico gerado pela aplicação do sinal elétrica (excitação harmônica) no elemento ativo (cerâmica pura de PZT). O propósito dessa análise foi comparar os resultados da distribuição do campo de pressão simulado com os dados experimentais.

2.8.1 Parâmetros de configuração

A configuração dos parâmetros no COMSOL é feita por meio da definição de geometrias, propriedades de materiais, fenômenos físicos (pressão acústica, mecânica de sólidos, eletrostática e circuitos elétricos), tipo discretização (*mesh*) e modo de análise, (no domínio da frequência ou do tempo). O COMSOL permite simplificar a geometria em configurações com menos graus de liberdade, por exemplo, a configuração axissimétrica, resultando em um menor tempo de processamento. O modelo axissimétrico pode ser aplicado no caso das cerâmicas puras.

Do mesmo que para a solução analítica, as condições de contorno também são fundamentais para a solução gerada pela análise dos elementos finitos. Para se ter uma solução equivalente à solução analítica, o modelo de resposta impulsiva (WEIGHT, 1984) é importante apresentar as condições de contorno que definem a configuração de pistão plano. Deve-se ter em conta que o modelo de pistão plano é caracterizado pelo deslocamento unificado e sincronizado de toda a superfície da fonte emissora.

A figura 7a mostra o esquema da geometria do transdutor para acoplamento em ar e a distribuição dos materiais. Já, a figura 7b apresenta o tipo de fenômeno físico usado em cada um dos domínios que são representados pelas cores azul escuro, azul claro e verde, os quais correspondem, respectivamente, aos sólidos com deformações elásticas (camadas de acoplamento passivas), ao sólido com efeito piezelétrico e eletrostático (elemento ativo) e ao fluido com propagação acústica (água ou ar). Finalmente, a figura 7c mostra o tipo de discretização implementada, que é uma tesselação triangular com tamanho máximo para o elemento de $\frac{\lambda}{5}$, valor que permitiu a convergência (ver na seção 3.6) para os dados experimentais de campo acústico emitido pelo pistão plano, o qual está ligado a restrição nos contornos radiais do emissor. A restrição radial impõe um deslocamento nulo dos materiais sólidos nessa coordenada, permitindo o deslocamento uniforme de toda a superfície da membrana porosa em contato com o fluido.

Além disso, o COMSOL permite adicionar o efeito da atenuação no fluido (água

Figura 7: a) Geometria, materiais, b) física usada em cada domínio e c) grau de discretização e condições das bordas programado no COMSOL para um transdutor para acoplamento em fluidos.

ou ar) e as perdas (*damping*) nos materiais elásticos. A atenuação no fluido ocasiona uma dissipação de energia da onda durante a propagação acústica nesse meio.

3 PROJETO DE TRANSDUTORES PARA ACOPLAMENTO EM AR

Este trabalho, propõe-se selecionar ressonadores ativos (piezocerâmicos) e camadas de acoplamento acústico que aumentem a transferência de energia e a banda de operação de transdutores ultrassônicos para emissão em ar. É apresentado um estudo detalhado da determinação dos parâmetros fundamentais dos materiais, com o objetivo de avaliar os critérios de escolha que possibilitassem aperfeiçoar os processos de construção.

Logo, o conteúdo deste capítulo está ligado principalmente a:

- Implementação da equação de coeficiente de transmissão para a seleção ótima de parâmetros (espessura, impedância acústica e atenuação acústica) das camadas de acoplamento em ar em frequências próximas a 0,5 e 1 MHz.
- Implementação da avaliação das expressões analíticas com várias camadas de acoplamento para escolha do número mais adequado.
- Implementação do modelo eletromecânico para a seleção do elemento ativo e fabricação de piezocompósitos.
- Implementação do modelo numérico para a visualização da forma e distribuição do campo acústico usando os sinais elétricos no elemento ativo como variáveis de entrada.

3.1 Espessura, impedância e atenuação da camada de acoplamento

As camadas de acoplamento acústico são elementos do transdutor que maximizam a transferência de energia mecânica entre o elemento ativo e o meio de propagação.

Neste trabalho, foram propostos três parâmetros para a seleção das camadas: geometria, tipo de material e quantidade de camadas. O primeiro parâmetro está ligado à seleção da espessura que permite a ressonância nesse modo, enquanto o segundo e o terceiro parâmetro são dirigidos à escolha do tipo de material (impedância acústica e atenuação) e o número de elementos passivos (camadas), respectivamente.

Para o cálculo da espessura é usada a equação 2.22, lembrando que esta equação foi obtida assumindo frente de onda plana e progressiva, com incidência normal sobre o meio 2 (esforços normais na camada de acoplamento). Além disso, considerou-se todos os meios homogêneos na direção da propagação da onda e considerou-se também o efeito da atenuação. Para os casos das figuras 8a e 9a, usou-se α_λ (Np) constante em cada um dos materiais do meio 2. Por outro lado, a atenuação empregada nos casos das figuras 8b e 9b é introduzida como um vetor, por exemplo, $\alpha = 0-3 \frac{kNp}{m}$, quer dizer, uma atenuação entre zero até 3000 $\frac{Np}{m}$ que varia linearmente com a frequência para esse material. Os primeiros resultados extraídos dessa equação são os padrões de amplitude em função do comprimento de onda (fig. 8a) e os padrões de amplitude em função da frequência (fig. 8b) quando os meios 1 e 3 têm o mesmo valor de impedância acústica ($Z_1 = Z_3 = Z_{ar}$), ou seja, a impedância acústica do ar.

Figura 8: T_I vs λ e frequência com variações de Z_2 com $Z_{1,3} = 414 rayl$.

Na figura 8a, observa-se que o sistema com $Z_{1,3} = Z_{ar} = 414 rayl$ apresenta máximos coeficientes de transmissão de intensidade (T_I) quando a espessura do meio 2 (camada) é $\frac{n\lambda}{2}$ sendo $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Isso equivale, por exemplo, à $400 \mu m$ para $n=1$ com frequência de 0,5 MHz num material com uma velocidade de propagação próxima a 400 m/s. A amplitude T_I diminui com o aumento da espessura da camada de acoplamento, resultado da atenuação. A banda de cada pico muda significativamente

como o tipo de material, quer dizer, um material do meio 2 com maior diferença de impedância acústica em relação aos meios 1 e 3 resulta numa banda mais estreita (p. ex. para $Z_2 = 1,5 \text{ Mrayl}$).

A figura 8b, mostra os coeficientes de transmissão em função da frequência para $Z_{1,3} = 414 \text{ rayl}$ e espessura do material 2 de $80 \mu\text{m}$. Do mesmo modo, a figura apresenta um conjunto de picos que decaem com o aumento da frequência. Os picos com menor amplitude são gerados pelos materiais que tem a maior diferença de impedância acústica, em relação aos meios 1 e 3, ou seja, aqueles que têm a maior diferença de impedância acústica com a do ar. Os valores apresentados de impedância e atenuação são os reportados por materiais como Aerogel (70 krayl , $\alpha_\lambda = 0,4 \text{ Np}$), membranas de filtragem ($150\text{-}300 \text{ krayl}$, $\alpha_\lambda = 0,2\text{-}0,3 \text{ Np}$), e água ($1,5 \text{ Mrayl}$, $\alpha_\lambda = 0,08 \text{ Np}$) (ÁLVAREZ-ARENAS, 2004).

O estudo do coeficiente de transmissão $|T_I|$, no caso $Z_1 = Z_3$, é relevante porque a montagem da caracterização dos materiais passivos aplica uma configuração parecida ($Z_{1,3} = Z_{\text{Acrílico}}$), como apresentado no capítulo 4.

Por outro lado, para o caso em que $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$ (figuras 9a e 9b), foram avaliados os valores de impedância $Z_1 = Z_{\text{pzt}}$ (32 Mrayl), $Z_3 = Z_{\text{ar}} = 414 \text{ rayl}$ (meio de propagação) e no meio 2 uma espessura de $80 \mu\text{m}$ com valores de impedância de 70 krayl com $\alpha_\lambda = 0,4 \text{ Np}$ (linha azul), $150\text{-}300 \text{ krayl}$ com $\alpha_\lambda = 0,2\text{-}0,3 \text{ Np}$ (linhas amarela e vermelha) e $2,6 \text{ Mrayl}$ com $\alpha_\lambda = 0,01 \text{ Np}$ (linha roxa). Os valores do material avaliados na linha roxa concordam com as propriedades da resina epóxi ($2,6 \text{ Mrayl}$ e $\alpha_\lambda = 0,01 \text{ Np}$). Nessa configuração, embora os padrões das curvas são similares aos apresentados na figura 8, os picos dos máximos de amplitude em função do comprimento de onda estão deslocados (fig. 9a). Esses deslocamentos correspondem a metade em relação à figura 8a, ou seja, $\frac{(2n-1)\lambda}{4}$ com $n=1,2,3,\dots$. No caso da amplitude $|T_I|$ em função da frequência, observa-se o seu decaimento devido à atenuação, cuja variação é linear com a frequência. Além disso, verifica-se também a diminuição dos picos de ressonância quanto maior for a impedância acústica do material do meio 2.

A configuração 1 ($Z_2 \neq Z_1 = Z_3$), mostrada na figura 8 e a configuração 2 ($Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$), mostrada na figura 9, estão relacionadas pelas frequências de ressonância. A camada caracterizada na configuração 1 é usada na configuração 2 (camada entre o elemento ativo e o ar), considerando a seguinte relação entre as frequências de

Figura 9: T_I para diversos valores de Z_2 .

ressonância:

$$f_{r2} = \frac{f_{r1}}{2} \quad (3.1)$$

onde f_{r1} e f_{r2} são o primeiros picos de ressonância obtidos na configuração 1 e 2, respectivamente.

Ao avaliar a amplitude $|T_I|$ em função de Z_2 , é possível obter o padrão apresentado na figura 10a, na qual só tem sentido físico os valores de impedância positivos. As máximas amplitudes são dadas por $Z_2 = \pm \sqrt{Z_1 Z_3}$ e obtidas analiticamente da equação 2.22 ao se fazer $\frac{\partial T_I}{\partial Z_2} = 0$. As cores das curvas representam as impedâncias do meio 3 (ar=azul com $Z_3 = 414 \text{ rayl}$, aerogel=vermelha com $Z_3 = 70 \text{ krayl}$, membrana porosa=amarela com $Z_3 = 200 \text{ krayl}$ e água=roxa com $Z_3 = 1,5 \text{ Mrayl}$). As curvas da figura 10a são apresentadas na variável independente (Z_2) em escala logarítmica na figura 10b. É possível observar que a seção de banda de impedância acústica que permite a transmissão de energia para o ar como meio de propagação (curva azul, ou seja 414 rayl) é quase duas ordens de grandeza menor do que a banda de impedância acústica que permite a transmissão de energia para a água.

Isso explica porque os materiais com alta densidade quase não conseguem transferir energia até o ar a partir do elemento ativo. Desse modo, é possível intuir que a densidade e a velocidade do material usado para este propósito devem ser menores que da água e da maioria dos materiais orgânicos rígidos. O valor de impedância de uma camada para acoplamento em ar deve estar entre 0,02 e 0,5 Mrayl (10% de $|T_I|$).

Figura 10: T_I em função Z_2 . Figura 11: T_I em função Z_2 variando α_λ .

As figuras 11a e 11b mostram o efeito da atenuação no coeficiente de transmissão para acoplamento em água e ar. Os valores de α_λ para as camadas de acoplamento em água e ar entre 0 e 0,2 Np. Isso equivale a intervalos de α entre 0 e $50 \frac{Np}{m}$ para os materiais de acoplamento em água e entre 0 e $500 \frac{Np}{m}$ para o acoplamento em ar (ÁLVAREZ-ARENAS, 2004), operando em frequências próximas a 1 MHz. O material reportado com menor atenuação nessas condições é o aerogel com 0,06 Np (ÁLVAREZ-ARENAS, 2004).

Esses resultados mostram que a queda de energia nos materiais usados em camadas de acoplamento em ar é de aproximadamente 100 vezes (0,2 Np). Isso restringe os materiais que poderiam ser usados para esse propósito. Porém, os materiais baseados em misturas de celulose apresentam baixa atenuação (menores a 0,2 Np), além que

estão em forma de camadas de fácil manipulação.

3.2 Quantidade de camadas

A quantidade de camadas com espessura $\frac{\lambda}{4}$ requeridas em transdutores para acoplamento em ar pode ser determinada a partir da análise da figura 12a. Esse esquema é proposto assumindo que a transmissão de energia entre as camadas é ótima, ou seja, com um valor de impedância acústica de $Z_n = \sqrt{Z_{n-1}Z_{n+1}}$ em cada camada (ÁLVAREZ-ARENAS, 2004). As figuras 12b e 12c mostram as impedâncias ótimas para acoplamentos em água e ar, respectivamente. Foram feitas simulações combinando uma, duas, três, quatro e cinco camadas.

Figura 12: Efeito da quantidade de camadas sobre a impedância acústica Z_a das n camadas.

(b) Z_a para acoplamento em água.

(c) Z_a para acoplamento em ar.

A figura 12c mostra que, no caso do ar, o incremento do número de camadas requer materiais com impedância acústica (Z_a) muito baixa na última camada. Quando o número de camadas é reduzido a apenas uma camada, o valor de impedância requerido é máximo, ou seja, 0,1 Mrayl para acoplamento em ar ($Z_3 = Z_{ar} = 414rayl$) sendo

$Z_1 = Z_{pz} = 33 \text{ Mrayl}$). Considerando apenas uma camada, para habilitar um valor de impedância acústica próximo a $0,3 \text{ Mrayl}$ (valor apresentado nas camadas baseadas em celulose), deveria ser usada uma cerâmica com impedância acústica próxima de 200 Mrayl , cujo valor não é reportado para nenhum material. Para a configuração de uma camada, pode ser empregado o aerogel, o qual fornece valores de impedância acústica próximos a $0,04 \text{ Mrayl}$ (ÁLVAREZ-ARENAS, 2004).

Como a fabricação de peças feitas de aerogel pode ser complicada ou pouco prática, é preciso avaliar também o caso de se utilizar duas camadas entre o elemento ativo e o ar, o que permitiria empregar materiais com propriedades mais acessíveis. Para ajudar na escolha desses materiais, deve ser considerada a banda de resposta do sistema, como mostra a figura 13.

Figura 13: Efeito das camadas na resposta medida no ar, considerando $c_{cam1} = \text{constante}$.

Os resultados da figura 13a foram obtidos ao configurar o modelo matricial (eq. 2.71) com as propriedades de uma placa piezelétrica de Pz37 ($f_r = 1 \text{ MHz}$, área de $20 \times 20 \text{ mm}^2$, $\rho = 6200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ e a velocidade de propagação de aproximadamente $5000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), em contato com uma única camada (espessura $\frac{\lambda}{4} = 0,62 \text{ mm}$ e velocidade de propagação constante $c_{cam1} = 2400 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) na superfície emissora. Ao variar a impedância acústica da camada, ou seja, a sua densidade ($c_{cam1} = \text{constante}$) é possível perceber que os materiais com Z_a próximos aos 3 Mrayl (disponibilidade real com a velocidade de propagação proposta, $2400 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) geram um aumento significativo da banda da resposta elétrica. No entanto, este crescimento da banda resulta em uma queda da amplitude (condutância) na zona de ressonância natural da cerâmica (1 MHz). Assim, obter o

máximo da condutância (componente real da admitância Y) em 0,95 MHz implica o uso de um material com uma impedância menor a 0,1 Mrayl, o que não é prático, como foi explicado anteriormente.

Ao misturar os efeitos de duas camadas, uma com alta impedância acústica (próxima aos 3 Mrayl com $c_{cam1}=2400 \frac{m}{s}$; linha roxa da figura 13a) e outra com baixa impedância acústica (menor que 0,5 Mrayl com $c_{cam1} \cong 530 \frac{m}{s}$; fig. 13b espessura $\frac{\lambda}{4}$), obtém-se uma curva com três picos. Esse padrão de três picos é devido à interação dos três materiais com densidades e velocidades distintas (espessuras $\frac{\lambda}{2}$ para o PZT e $\frac{\lambda}{4}$ para duas camadas de acoplamento), o qual gera um sistema com 3 modos de vibrar no modo de espessura. O caso ideal -linha azul -, com os picos mais equilibrados precisa de valores que dificultam sua implementação (material da segunda camada com 60 krayl).

Embora o modelo matricial permita usar valores quaisquer para densidade, deve-se lembrar que na realidade não é possível separar a velocidade de propagação da densidade no material, os efeitos deles estão intrinsecamente ligados. Ao usar os valores da velocidade ligada à densidade, obtém-se as figuras 14a e 14b, onde a linha azul pode representar o aerogel ($\rho = 140 \frac{kg}{m^3}$), a linha vermelha, a celulose ($\rho = 700 \frac{kg}{m^3}$), a linha amarela o poliestireno ($\rho = 985 \frac{kg}{m^3}$) e a linha roxa, a resina epóxi ($\rho = 1200 \frac{kg}{m^3}$). Pode-se apreciar que a maior densidade, o material apresenta maior velocidade de propagação (ou seja, a velocidade de propagação é diretamente proporcional à densidade). A avaliação daqueles valores no modelo matricial para uma camada permite notar a geração de um pico no caso da curva azul (aerogel). Deve-se recordar que considerou-se o backing de ar.

Ao usar o modelo matricial com duas camadas, com graus de porosidade (propriedade ligada à densidade e, assim, à impedância acústica) diferentes em um ordem de grandeza- disponíveis ou facilmente sintetizáveis-, obtém-se a linha roxa da figura 14b, na qual representa o efeito da impedância acústica na amplitude de duas camadas consecutivas sobre uma cerâmica piezelétrica com o backing de ar (414 rayl). Parecido ao caso com só uma camada, ocorre um aumento na banda de resposta como resultado do efeito amortecedor das duas camadas. A adição de um material passivo na face traseira do transdutor geraria queda significativa na sensibilidade, o que reduziria o desempenho dos protótipo. Por isso, o ar é usado como material ideal do backing.

Os valores propostos de espessura, impedância acústica, atenuação e número de

Figura 14: Efeito das camadas na banda de resposta com propriedades reais.

camadas de acoplamento, serão resumidos na seção 3.5.

3.3 Sintonização da Cerâmica

Devido à impossibilidade de mudar a espessura das camadas de acoplamento disponíveis no mercado (membranas de filtragem), é necessário sintonizar a frequência do elemento ativo às frequências de ressonância de algumas das camadas de acoplamento. Esse processo é relativamente mais simples. Para isso, considera-se o modelo elétrico sem cargas acústicas (eq. 2.55). A figura 15 apresenta o padrão de admitância (inverso da equação 2.55) numa cerâmica (tendo em conta o efeito dos atrasos na energia). As perdas foram introduzidas no modelo por meio dos atrasos (ψ) definido pelos componentes real e imaginário da propriedade de cada material (ver eq. 2.57).

Na linha contínua da figura 15a, observa-se que os pontos de ressonância e anti-ressonância (máximos e mínimos, respectivamente) da curva de admitância tendem ao infinito e a zero, respectivamente, e que a distância entre esses pontos são muito pequenas. Esse padrão é similar ao apresentado pelo comportamento elétrico das cerâmicas no estado puro. As linhas descontinuas (fig. 15a) são produzidas quando os atrasos (ψ) diminuem e a banda definida entre os picos de ressonância e antirressonância aumentam com a queda na amplitude.

Ao reduzir o valor da constante elástica C_{33}^D (um dos parâmetros do fator de acoplamento k_t definido na equação 2.42) do material ativo no primeiro modelo elétrico (eq. 2.55), a banda do sistema aumenta com o deslocamento da frequência de operação

Figura 15: Efeito das perdas e diminuição na rigidez no elemento ativo.

central (fig. 15b). Na prática, o módulo elástico pode ser reduzido significativamente ao mudar a rigidez da estrutura. Essa rigidez está ligada à concentração de material ativo nos materiais compostos. O processo que permite a redução do grau de concentração do material piezelétrico, quer dizer, diluição, pode ser usado nas cerâmicas. O objetivo é obter piezocompósitos com outros valores de ressonância que possibilitem o casamento ótimo com as camadas de acoplamento. A redução de aproximadamente 50 % da densidade do elemento, como o reportado em (GACHAGAN et al., 1996) permite duplicar a banda sem perdas excessivas na sensibilidade.

3.4 Camada adesiva

Para unir os componentes é necessário usar colas que não interfiram, contaminem ou atrapalhem o desempenho das camadas de acoplamento, no caso, das membranas de filtração. Assim, neste trabalho, é proposto o uso de um adesivo líquido instantâneo com propriedades próximas às propriedades da resina epóxi. A fase líquida inicial do adesivo deve permitir uma quantidade mínima de cola entre os elementos ($Cam_1 - Cam_2$), para obter espessuras entre 10-20 μm que fornecem alta rigidez e baixa atenuação. Além disso, sua viscosidade, velocidade de secagem e tensão superficial no estado líquido devem impedir a infiltração nos furos das camadas porosas, evitando mudar ou danificar as propriedades. No caso da união de PZT-resina epóxi, esta última pode ser agregada em fase líquida na superfície do PZT, na qual fica aderida, após o processo de cura.

3.5 Parâmetros de projeto

Nesta seção, baseando-se nas análises anteriores, são apresentadas as combinações dos materiais passivos e ativos usados na fabricação dos protótipos de transdutores para acoplamento em ar. Essas combinações foram obtidas a partir dos parâmetros de projeto (espessura, impedância acústica e atenuação das camadas, bem como da quantidade de camadas) e do tipo de elemento ativo (piezocerâmico puro ou piezocompósito). Os protótipos propostos são elementos ativos puros ou piezocompósitos operando em modo espessura junto com camadas de acoplamento densas e porosas. Os valores das propriedades geométricas e estruturais desses materiais são resumidos nas tabelas de 1 a 5. Em todos os casos, o material do backing foi o ar. Essas informações atendem ao primeiro objetivo específico deste trabalho que trata da seleção dos materiais ativos e passivos, permitindo, assim, dar início ao processo de fabricação dos transdutores.

Tabela 1: Parâmetros de projeto considerando como elemento ativo o APC855 puro (Protótipo 1)

APC855			$Z_a = 30 - 32 \text{ Mrayl}$		$f_r = 0,5 \text{ MHz}$	
Qtd	C. Passiva	Material	Espessura[μm]	Z_a [Mrayl]	α_λ [Np]	f_r [MHz]
1	Backing	Ar	α	0,000414	1-2	-
1	ML_1	Resina Epóx	1250-1450	2,6	0,05*	0,45-0,55
1	ML_2	Cam. porosa	105-165	0,2-0,5	0,1-0,2	0,45-0,55

Tabela 2: Parâmetros de projeto considerando como elemento ativo o compósito APC855 (Protótipo 2)

APC855 Compósito			$Z_a = 14 - 17 \text{ MRayl}$		$f_r = 0,4 \text{ MHz}$	
Qtd	C. Passiva	Material	Espessura[μm]	Z_a [Mrayl]	α_λ [Np]	f_r [MHz]
1	Backing	Ar	α	0,000414	1-2	-
1	ML_1	Resina Epóxi	1750-1950	2,6	0,05*	0,35-0,45
1	ML_2	Cam. porosa	180-250	0,2-0,5	0,1-0,15	0,35-0,45

Tabela 3: Parâmetros de projeto considerando como elemento ativo o Pz37 puro (Protótipo 3)

Pz37			$Z_a = 20 - 27 \text{ Mrayl}$		$f_r = 1 \text{ MHz}$	
Qtd	C. Passiva	Material	Espessura[μm]	Z_a [Mrayl]	α_λ [Np]	f_r [MHz]
1	Backing	Ar	α	0,000414	1-2	-
1	ML_1	Resina Epóxi	600-700	2,6	0,05*	0,95-1,05
1	ML_2	Cam. porosa	105-145	0,2-0,5	0,1-0,15	0,95-1,05

Tabela 4: Parâmetros de projeto considerando como elemento ativo o compósito Pz37 (Protótipo 4)

Pz37 Compósito			$Z_a = 7 - 10 \text{ Mrayl}$		$f_r = 0,8 \text{ MHz}$	
Qtd	C. Passiva	Material	Espessura[μm]	Z_a [Mrayl]	α_λ [Np]	f_r [MHz]
1	Backing	Ar	α	0,000414	1-2	-
1	ML_1	Resina Epóxi	600-700	2,6	0,05*	0,75-0,95
1	ML_2	Cam. porosa	105-145	0,2-0,5	0,1-0,15	0,95-1,05

Tabela 5: Parâmetros de projeto considerando como elemento ativo o APC855 puro (Protótipo 5)

APC855 puro			$Z_a = 30 - 32 \text{ Mrayl}$		$f_r = 0,5 \text{ MHz}$	
Qtd	C. Passiva	Material	Espessura[μm]	Z_a [Mrayl]	α_λ [Np]	f_r [MHz]
1	Backing	Ar	α	0,000414	1-2	-
1	ML_1	Aerogel	140-250	0,04-0,07	0,04-0,05 ★	0,4-0,6

Valor de * α_λ (Resina epóxi) reportado em (ÁLVAREZ-ARENAS, 2010) e ★ valor de α_λ (aerogel) reportado em (ALVAREZ-ARENAS, 2004). Com os dados da tabela 2 pode-se afirmar que o protótipo do transdutor baseado no compósito de APC855 (frequência de operação menor que 0,5 MHz) pode dificultar na escolha da segunda camada passiva ao se usar membranas de filtragem, Isso ocorre porque as membranas porosas não estão disponíveis para espessuras maiores do que 150 μm , dificultando sintonizar na frequência que permite a máxima transmissão de energia.

3.6 Campo acústico usando o Método de Elementos Finitos (MEF)

O primeiro passo para o uso do modelo numérico é avaliação do grau de discretização. Na figura 16 é apresentada a influencia do incremento do tamanho do elemento triangular da malha na geração do campo acústico. Nessas simulações, modelou-se o transdutor como pistão plano (restrição radial), emitindo (395,5 kHz) em água ($c = 1500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) e com uma camada de araldite ($\rho = 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) de espessura $\frac{\lambda}{4}$. A configuração esperada do campo acústico deve mostrar que o início do campo distante ocorre em $\frac{r^2}{\lambda}$, sendo r o raio da abertura emissora.

A figura 16 mostra que o tamanho do elemento triangular deve ser menor $\frac{\lambda}{3}$ para obter o campo acústico mais próximo do real. Tendo em conta que o meio de propagação neste trabalho é o ar, apresentando um comprimento de onda menor que o da água,

Figura 16: Efeito do tamanho do elemento triangular da malha no resultado do campo acústico. Vermelha = mínimo tamanho certo para simulação em água, Verde = tamanho aplicada neste trabalho para simulação de emissão em água e ar.

optou-se por trabalhar com elementos não muito menores que $(\frac{\lambda}{3})$, a fim de evitar uma discretização excessiva do meio que aumentasse muito o tempo de processamento. Assim, o tamanho de elemento empregado nas simulações foi de $\frac{\lambda}{5}$.

Desse modo, a figura 17a mostra o campo acústico obtido com a configuração do transdutor para acoplamento em água que serve como referência para comparação de resultados. O padrão de resposta acústica gerada pelo MEF para acoplamento em ar, considerando o PZT puro com duas camadas passivas, é apresentado na figura 17b. Em ambos os modelos, considerou-se uma restrição nos deslocamentos radiais dos elementos ativo e passivo. Na seção 4.5 é descrita a montagem experimental para o mapeamento do campo acústico, cujos resultados serão comparados com os resultados numéricos.

Para a obtenção do campo acústico (figura 17a) considerando o transdutor para acoplamento em água, foi aplicada uma excitação contínua de 395,51 kHz com amplitude 100 V. Nesse caso, foi usada somente uma camada de acoplamento (epóxi). A linha preta horizontal na figura 17a indica onde termina o campo próximo e inicia o campo distante, que concorda com a expressão $\frac{r_{pz}^2}{\lambda_{agua}} = 0,059m$ do modelo analítico (KINSLER, 2000).

Por outro lado, para a obtenção do campo acústico 17b, foram usadas duas ca-

Figura 17: Distribuição de pressão acústica normalizada para transdutores acoplados a a) água e b) ar em excitação contínua com restrição no deslocamento radial.

madras de acoplamento acústico no transdutor para acoplamento em ar, sendo uma de epóxi e outra de membrana de celulose. Nesse caso, é apresentado somente o campo próximo porque o campo distante inicia somente em $\frac{r_{pt}^2}{\lambda_{ar}} = 0,277m$. A pressão máxima (setores vermelhos) obtida em cada um dos campos acústicos foi de 60 kPa para emissão em água e de 57 Pa para emissão em ar.

Para obter a condição de contorno que evite o deslocamento radial no protótipo real, as bordas circulares da cerâmica deveriam ficar coladas com algum tipo de material rígido (aço, epóxi, etc). Porém, isso não foi feito neste trabalho devido à grande queda da sensibilidade pelo uso de amortecedores, como foi explicado ao final da seção 3.2. Desse modo, a simulação do campo acústico deve ser feita sem restrições radiais nos componentes ativos e passivos do transdutor, como mostram os resultados apresentados na figura 18.

A figura 18a (emissão na água) mostra a mudança drástica na distribuição de energia e a não concordância da localização do foco natural dada pela regra do $\frac{r_{pt}^2}{\lambda}$ que

Figura 18: Distribuição de pressão acústica normalizada para transdutores acoplados a a) água e b) ar em excitação contínua sem restrição no deslocamento radial.

define a região entre o campo próximo e o campo distante. No caso da emissão em ar (fig. 18b), o padrão diverge significativamente da configuração de pistão plano (fig. 17b). resultados indicam que os campos acústicos obtidos com os modelos com e sem restrição radial nas bordas dos elementos ativo e passivos são fundamentalmente diferentes.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os critérios de parâmetros apresentados na secção anterior são usados para a seleção dos potenciais materiais a serem empregados na fabricação dos transdutores para acoplamento em ar, determinando as propriedades mecânicas, dielétricas e eletromecânicas desses materiais. Geralmente, a caracterização mecânica dos elementos passivos trata da determinação da atenuação (α), velocidade de propagação (c_3) e densidade (ρ), além da estimativa da impedância acústica específica (Z_a) e da constante elástica (C_{33}). Por outro lado, a caracterização eletromecânica foca na determinação dos parâmetros eletromecânicos e dielétricos do elemento ativo usados no cálculo do fator de acoplamento (k_t), grau de sensibilidade e largura de banda de operação.

Neste capítulo são apresentados:

- Elementos ativos usados;
- Potenciais camadas de acoplamento disponíveis;
- Viabilidade do aerogel como camada de acoplamento;
- Caracterização dos materiais passivos e ativos;
- Fabricação e caracterização dos protótipos.

4.1 Elemento ativo

Neste trabalho, foram usadas as cerâmicas APC855 (APC International) e Pz37 (Ferroperm), ambas baseadas em titanato de zirconato de chumbo (PZT). Em geral, a vantagem deste tipo de ressonadores piezelétricos está relacionada à possibilidade de resposta de frequências na ordem de MHz, além do baixo custo e robustez.

A cerâmica Pz37 apresenta uma impedância acústica baixa (50 % menor) em relação ao APC855. Uma baixa impedância acústica facilita o acoplamento em meios com baixa densidade.

4.2 Potenciais camadas de acoplamento

Nas aplicações dos transdutores para emissão em sólidos ou imersão em líquidos, com densidades similares à água, são usadas camadas de materiais para acoplamento acústico baseadas em resinas epóxi misturadas com alumina em pó (Óxido de Alumínio) em concentrações que permitam a impedância acústica requerida ($\sqrt{Z_1 Z_3}$).

No caso do ar, a gama de materiais disponíveis é reduzida, a impedância deve ser bem baixa (menor que 0,1 Mrayl). Tais valores não são obtidos nas misturas convencionais de epóxi e alumina.

As camadas de filtração de alta porosidade utilizadas em laboratórios ou processos de filtração química tem valores de impedância acústica próximos à requerida pela camada de adaptação situada entre PZT e o ar. Além disso, essas camadas são muito finas e de boa qualidade, o que permite sua fácil manipulação (ÁLVAREZ-ARENAS, 2004), (ÁLVAREZ-ARENAS; MONTERO, 2002).

Existe um grupo de materiais baseados em sílica, usados como isolante térmico e químico, como os xerogéis. Um tipo de xerogel é o aerogel, que é produzido usando secagem à alta pressão. Embora as propriedades desse material sejam ideais (impedância menor que 0,1 Mrayl), sua manipulação é complicada, devido ao alto grau de fragilidade, impedindo a construção de camadas de acoplamento (GÓMEZ et al., 2002).

Neste trabalho, foram propostas quatro diferentes camadas baseadas em fibras de éster de celulose, celulose, fluoreto de polivinilideno (todas elas comerciais e de fácil manipulação) e o aerogel (material com propriedades mais aptas para acoplamento em ar, embora de difícil fabricação e manipulação).

4.2.1 Camadas de filtração

Este tipo de material foi feito inicialmente com o propósito de reter os solutos contidos em misturas aquosas. O tamanho das partículas que deixam passar é da ordem de dezenas de nanômetros. Essa porosidade faz com que a camada tenha baixa densi-

dade e, portanto, baixa impedância acústica. Por outro lado, no processo de fabricação das camadas, as fibras ficam orientadas numa única direção, o que reduz a rigidez da estrutura, além de resultar em reverberações no interior do material, causando perdas de energia.

4.2.2 Aerogel

Ao contrário das folhas de celulose, o aerogel apresenta uma estrutura tridimensional mais rígida, o que permite níveis de atenuação mais baixos. O aerogel é sintetizado (SMIRNOVA; GURIKOV, 2018) através da polimerização de TEOS (tetraetilortossilicato). Após o processo de gelação, procede-se a secagem supercrítica com CO_2 . A secagem permite uma rede tridimensional rígida ao extrair moléculas de etanol e substituí-las por moléculas de CO_2 , o qual volatiliza-se a 1 atm e 35 °C (SMIRNOVA; SUTTIRUENGWONG; ARLT, 2005).

Esse processo de fabricação gera um material com uma densidade parecida a do ar ($20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 150 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$). Como esse material apresenta um alto grau de fragilidade, dificultado sua manipulação (usinagem), as camadas de aerogel devem ser feitas diretamente na superfície do transdutor. Entretanto, tal procedimento de construção dificulta o controle da espessura.

Para fabricar o material foi usado um reator de alta pressão (cilindro de área $12^2 * \pi \text{ mm}^2$ e altura 40 mm, disponível no Laboratório de Pressões Supercríticas do Instituto de Química da USP), onde foi possível posicionar os elementos do transdutor (molde com cerâmica) e fazer o processo da secagem (fig. 19a).

O primeiro passo foi o corte das cerâmicas de APC855 na máquina ISOMet 4000 na dimensão de $8 \times 8 \text{ mm}^2$. As cerâmicas cortadas foram inseridas num molde plástico e fixadas numa superfície lisa (fig. 19b). No passo seguinte, a solução foi feita, 1 mol TEOS:MeOH 2,4 mol misturado com 1,3 mol $\text{H}_2\text{O}:\text{HCl}$ 10^{-5} mol. A mistura foi agitada por 20 minutos e despejada (1 mm^3) na superfície exposta da cerâmica. A seguir, os moldes foram fechados hermeticamente para evitar a evaporação dos componentes da solução. O conjunto foi mantido na geladeira a 5°C por 72 horas. Esse processo permitiu que a solução sobre as superfícies das cerâmicas mudasse para a fase coloidal (gel), ou seja, uma mistura de fases sólida e líquida (sendo sólido a estrutura de TEOS e líquida o etanol inserido na rede de TEOS). Os moldes foram inseridos no reator, o reator foi submergido em água com uma temperatura próxima a 36°C. O próximo passo

Figura 19: Materiais para a síntese do aerogel

(a) Regentes e reator

(b) Moldes e cerâmicas posicionadas nos moldes

foi a geração de uma corrente de CO_2 a alta pressão (próxima de 100 bar) dentro do reator. Esse processo (secagem supercrítica) removeu a fase líquida (etanol) completamente. Finalmente, quando a corrente de CO_2 foi desligada, a pressão foi normalizada (1 bar) e o CO_2 da estrutura do TEOS foi liberado, resultando em um material muito poroso.

Embora a síntese do aerogel fosse certa, o processo de extração dos moldes, a manipulação dos contatos elétricos da cerâmicas, e a umidade do ambiente, danificaram gradualmente a camada depositada e não permitiram os testes de emissão ou recepção dos sinais acústicos.

4.2.3 Resina Epóxi e adesivo

A resina epóxi misturada com alumina em pó é amplamente empregada na construção de camadas de acoplamento entre a cerâmica piezelétrica e a água. Neste trabalho, a resina epóxi é usada em estado puro nos processos de fabricação dos piezocompósitos e como primeira camada de adaptação para acoplamento em ar. A mistura curada por 2 horas a 50°C, tem uma composição (peso) de 10:1 de Araldite GY e Aradur HY, respectivamente. Além de acelerar o processo de secagem, o curado do epóxi incrementa a homogeneidade no material (isotrópico). A impedância acústica da resina epóxi pura é menor do que a da misturada com alumina.

Como descrito no capítulo anterior, foi usada uma cola de secagem rápida para fixar a membrana de filtração na superfície da primeira camada de adaptação, evitando que na aplicação as porosidades da membrana fossem preenchidas pela cola. Foi usada a cola baseada em *2-Cianoacrilato de etilo*, que não entra em furos menores que 0,1 mm (www.heypar.com). É um polímero de secagem instantânea, com propriedades parecidas à camada de resina de araldite curada.

Dependendo do tipo de elemento ativo usado (piezocerâmicas ou piezocompósitos), foram usados de maneira específica os materiais passivos (epóxi, membranas de filtração e aerogel) como apresentado na tabela 6. Os protótipos 1,2...5 foram propostos ao final do capítulo 3.

Tabela 6: Materiais usados na fabricação dos protótipos

Componentes	Fabricante	Espessura	Protótipos
APC855	APC Int.	4 mm	1,2,5
Pz37	Ferroperm	1,45 mm	3,4
Mistura Celulose-MC 0,45	Millipore	126 μm	1,2
Ester Celulose-EC 0,45	Millipore	135 μm	-
Ester Celulose-EC 0,22	Millipore	110 μm	-
Fluoreto Polivinilideno	Whatman Int.	45 μm	2,3
Resina epóxi	Araldite	7,6 mm	1,2,3,4
2-Cianoacrilato de etilo	Loctite	-	1,2,3,4
Aerogel	Lab. Química USP	80-180 μm	5

4.3 Caracterização das camadas passivas

A medição das propriedades da camada de epóxi e membranas porosas de filtração foi feita com uma técnica que requer o contato direto com materiais sólidos (neste trabalho foi usado acrílico). Existem outras técnicas que dispensam o contato sobre a amostra porosa, mas requerem transdutores de banda larga e alta sensibilidade para acoplamento em ar, que não estão disponíveis comercialmente. Este fato foi confirmado neste trabalho após o uso de um conjunto de transdutores (3 pares) para acoplamento em ar (Ultran 0,5, 1 e 1,5 MHz) na caracterização das potenciais camadas de acoplamento. As medições realizadas com esses transdutores resultaram em um sinal de resposta muito débil que não permitiu a determinação do coeficiente de transmissão T_I .

Figura 20: Esquema da montagem para caracterização das camadas porosas

A montagem experimental para caracterização das camadas de epóxi e porosas é mostrada na figura 20. O experimento é constituído de um gerador de funções (comandado por um computador) ligado em paralelo com o osciloscópio (Agilent 5032, para verificação do sinal) e com o transdutor emissor de frequência central de 5 MHz para acoplamento em líquidos e sólidos. São usadas duas peças de acrílico (**A**, 13,8 mm de espessura) como linhas de contato, separando a membrana porosa (**C**) dos transdutores emissor (**E**) e receptor (**R**). A saída do receptor **R** foi ligada ao amplificador (Pulser/Receiver Panametrics 5072, 29 dB de ganho em todos os casos), cuja saída RF está conectada ao segundo canal do osciloscópio. Os sinais medidos são transferidos por meio da interface LAN usando um cabo de conexão direta entre o osciloscópio e o computador. Os sinais são processados posteriormente no MATLAB.

Figura 21: Montagem experimental de caracterização de camadas porosas: vista geral (lado esquerdo) e detalhe (lado direito)

Para garantir o pleno contato das peças, foi usada uma prensa (fig. 21), cuja pressão foi ajustada gradualmente até obter sinais de boa qualidade (baixo nível de ruído), impedindo deformações na espessura que afetem as propriedades dos valores reais das camadas (baixa compressibilidade). Uma camada muito fina de gel (CARBOGEL ULT) entre o transdutor (emissor *E* ou receptor *R*) e a peça de acrílico deve ser aplicada para garantir a transferência da onda ultrassônica.

Essa montagem foi usada para caracterizar as membranas porosas de dois modos. No primeiro modo, foi aplicado um pulso de excitação com uma duração de meio comprimento de onda da frequência de operação dos transdutores *E* e *R* com 10 Vpp de amplitude (modo pulsado). No segundo modo, foram usados trens de ciclos (com 12 senoides) monocromáticos com incremento de frequência regular entre cada trem (modo Burst), como apresentado na secção dos resultados. A determinação experimental do coeficiente de transmissão (T_I) para os dois modos de excitação é feita pela seguinte expressão (KELLY; HAYWARD; ÁLVAREZ-ARENAS, 2004).

$$T_I = \left(\frac{|A_{amostra}|}{|A_{ref}|} \right)^2 \quad (4.1)$$

onde $A_{amostra}$ é a FFT do sinal com amostra, quer dizer, quando se tem a camada passiva entre as duas peças de acrílico; e A_{ref} é a FFT do sinal medido com as duas peças de acrílico em contato direto entre elas. A FFT (Fast Fourier Transformation) dos sinais é feito no MATLAB.

4.4 Construção e caracterização das cerâmicas e dos protótipos

A caracterização eletromecânica dos elementos ativos (APC855, Pz37 e respectivos compósitos) foi feita por meio de um impedômetro (Agilent 4294A) (fig. 22), o qual registrou e salvou os dados de impedância Z_e ou admitância Y para posterior comparação com os modelos teóricos.

Um exemplar de cada tipo de cerâmica pura foi transformado em piezocompósito com o objetivo de obter frequências de operação adicionais que permitissem o casamento das camadas anteriormente apresentadas. O padrão elétrico também foi medido em todas as etapas da construção dos transdutores, com o objetivo de perceber o efeito elétrico dos componentes passivos. Neste trabalho, foram fabricados quatro protótipos de transdutores de frequências próximas de 0,35 MHz, 0,5 MHz, 0,9 MHz e 1,0 MHz.

Figura 22: Montagem experimental para caracterização das cerâmicas

As figuras 23a e 23b apresentam o padrão de corte feito com a máquina de corte BUEHLER IsoMet 4000, usando um disco de corte adiamantado de 1 mm de espessura (BUEHLER isoCut). A cerâmica foi fixada numa superfície plástica e posicionada na área de corte. Os cortes foram feitos com avanço de 16 mm/min para evitar danificar o disco e uso-se água como refrigeração, espalhando diretamente na zona de corte. O sistema de movimentação da máquina permitiu fazer pilares de $2 \times 2 \text{ mm}^2$ no APC855 e 1 mm^2 no Pz37. Após os cortes feitos num sentido, as ranhuras foram preenchidas de resina epóxi na proporção, em peso, de 10:1 (Araldite GY 279BR-Aradur HY 9BR) e curadas por 2 horas a 50°C . O segundo corte foi feito nas cerâmicas na direção perpendicular das primeiras ranhuras seguindo o mesmo processo. As segundas ranhuras foram preenchidas do mesmo modo e curadas no forno. O processo intercalado de

corte e preenchimento com resina epóxi garantiu a formação dos pilares de elemento ativo.

Figura 23: Corte das cerâmicas e fabricação do piezocompósitos

Após o polimento das superfícies dos piezocompósitos, foi adicionada uma camada muito fina de resina condutora (ITW Chemtronics) que, uma vez curada, permitiu a adição dos cabos. Logo, ρ_o e Z_e foram medidos novamente (tabela 7).

Tabela 7: Concentração de material semiconductor nos ressonadores

	Densidade $\frac{kg}{m^3}$		
Material	Puro	Piezocompósito	Decremento %
APC855	7550	4770	36,9
Pz37	6165	2820	54,2

Depois da caracterização dos elementos ativos, a primeira camada de adaptação foi feita (mistura Araldite-Aradur com relação 10:1 em peso), vertida em forma líquida numa das faces das cerâmicas e dos piezocompósitos e curada no forno por 3 horas a $50^\circ C$. Depois a camada de adaptação foi polida até obter a espessura ótima ($\frac{1}{4}$). A segunda caracterização mecânica e elétrica foi feita. As camadas porosas, com espessura mais próxima da frequência de operação do material ativo, foram coladas sobre a camada de araldite, usando uma quantidade mínima de cola instantânea (2-Cianoacrilato de etilo), a qual foi distribuída homogeneamente na superfície do protótipo (fig. 24). Então, a última medição da impedância elétrica Z_e foi feita em todos os protótipos.

Figura 24: Protótipos fabricados

(a) Vista superior

(b) Vista lateral

Por outro lado, os sinais ultrassônicos no domínio do tempo, antes e depois da adição da segunda camada, foram medidos e guardados no computador para posterior processamento. Foram realizadas medições com os protótipos operando em modo pulso-eco e em modo de transmissão.

No modo de transmissão, como mostra a figura 25, os protótipos foram usados como emissor e os transdutores comerciais para acoplamento em ar (Ultran 0,5 e 1 MHz) como receptor. O receptor foi ligado ao Pulser/Receiver (Panametrics 5072) no modo de recepção, usando o mesmo ganho (20 dB) nas medições sem e com camadas. A distância entre o emissor e o receptor foi de 30 mm. O sinal de excitação aplicado nos protótipos foi um pulso quadrado ($1 \mu s$ para a cerâmica APC855 pura, $0,55 \mu s$ para o compósito de Pz37 e $0,5 \mu s$ para a cerâmica Pz37 pura) com amplitude de 10 Vpp (todos os casos), usando o gerador de funções (Agilent 3032).

Figura 25: Montagem usando o modo de operação transmissão

Figura 26: Montagem Pulso-Eco

Nos testes com os os protótipos operando no modo pulso-eco, uma lâmina de aço foi usada como refletor, posicionada a 80 mm do transdutor (fig. 26). O Pulser/Receiever (Panametrics 5072) foi usado no modo pulso-eco (ganho 55 dB). Esse arranjo experimental, permitiu avaliar a resolução axial do protótipo 1.

4.5 Forma de onda e campo acústico

O mapeamento dos campos acústicos nos pontos que conformam a malha em frente do protótipo 1 (malha de $34 \times 35 \text{ mm}^2$) e do transdutor comercial ($25 \times 35 \text{ mm}^2$) foi realizada com um sistema automático de posicionamento de 2 eixos, como apresentado na figura 27. O emissor foi excitado com o Pulser/Receiver (Panametrics 5072) em modo de transmissão. Foi usado como receptor um microfone de 3 mm de diâmetro (Brüel & Kjær 4138-A-015) ligado a um pré-amplificador Brüel & Kjær WH-3219, conectado ao sistema de aquisição de dados instalado no computador (National Ins-

Figura 27: Montagem experimental para medição do campo acústico

trumentos 5112 PCI) e configurado para obter 5000 pontos com taxa de amostragem de 3×10^6 amostras por segundo). Os dados foram adquiridos com uma resolução espacial de 0,1 mm (máxima resolução permitida pelo aparelho) no plano XY e foram processados posteriormente em MATLAB.

O ideal teria sido usar um receptor com diâmetro mais próximo do comprimento de onda no ar, possibilitando ver com mais detalhe o campo acústico gerado pelo protótipo. No caso do protótipo de 0,5 MHz, o diâmetro do receptor deveria ser de aproximadamente $\lambda = \frac{v_{ar}}{f_{0.5MHz}} = 0,6mm$. Além disso, o microfone deveria ter uma resposta em frequência maior, já que a calibração do microfone usado neste trabalho está entre 20Hz - 150kHz. Assim, o mapeamento do campo acústico do protótipo 1 (APC855 puro de 0,5 MHz), com o receptor de diâmetro 3 mm, mostrou somente o padrão geral do campo acústico gerado.

4.6 Discussão

Nesta seção, foram implementadas as técnicas de caracterização de materiais (acústicas e eletromecânicas) que permitiram determinação dos parâmetros dos materiais propostos (exceto o aerogel, que não apresentou estabilidade). Além disso, foram descritos os processos de fabricação dos transdutores, cujos protótipos foram construídos e avaliados com técnicas de grande difusão na literatura. Apesar de o aerogel ter sido depositado diretamente no material ativo, devem-se inserir algumas melhoras na síntese dessas camadas, tais como: uso de um reator de maior tamanho, que permita inserir cerâmicas com maior área de contato com o gel, e uso de o reagente TMOS, que evite o dano causado pela umidade do ar após o processo de secagem supercrítica. Desse modo, essas técnicas de caracterização, construção e avaliação usadas neste trabalho atendem os objetivos específicos 2, 3, 4, 5 e 6 apresentados na seção 1.3.

5 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentadas as respostas elétricas e mecânicas dos materiais que compõem o transdutor. São apresentados os resultados de caracterização das membranas porosas, caracterização eletromecânica do material piezelétrico puro e do piezo-compósito e caracterização durante as etapas de fabricação dos protótipos. Em seguida, são apresentadas as formas de onda do protótipo 1 operando em modo pulso eco, além disso, é realizada uma comparação entre os campos acústicos gerados pelo protótipo 1 e por um transdutor comercial. Finalmente, os protótipos com camada de aerogel são apresentados.

5.1 Caracterização das potenciais camadas de acoplamento

Ao implementar a montagem experimental para caracterização acústica, apresentada na seção 4.3, foram obtidas as curvas da resposta no domínio do tempo para quatro camadas de filtragem comerciais e para a resina epóxi.

Figura 28: Resposta mecânica das camadas no domínio temporal

A figura 28a apresenta a resposta a um pulso elétrico de $500ns$ com amplitude de $10 V_p$, enquanto a figura 28b mostra a resposta a excitações senoidais de 10 ciclos (burst) com frequências desde 1 a 4 MHz, em passos de 20kHz. Os sinais da figura 28 foram convertidos ao domínio da frequência pelo algoritmo da FFT e os coeficientes de transmissão T_I foram calculados usando a equação 4.1. A figura 29 mostra os coeficientes de transmissão experimentais para as seguintes membranas porosas MC - Mistura de éster celulose com $0,45 \mu m$ de poro, EC45 - éster de celulose com $0,45 \mu m$, PF - fluoreto polivinilideno e EC22 - éster de celulose com $0,22 \mu m$ de poro. No caso do modo burst, foi usado o máximo das transformadas em cada uma das frequências para comparar a resposta completa do domínio avaliada (fig.29b).

Figura 29: Resposta mecânica das camadas no domínio da frequência

As curvas de resposta das camadas apresentam diversos padrões de ressonância, nos quais é possível observar o efeito da atenuação. A frequência selecionada em cada caso (operação) foi a primeira. O padrão das respostas é praticamente o mesmo nos modos experimentais *pulsado* e *burst*. Neste trabalho, foram escolhidos os resultados do *burst* para a comparação com o coeficiente de transmissão teórico (eq. 2.23), como mostra a figura 30.

É possível afirmar que a curva do PF (fluoreto de polivinilideno, fig. 30c) apresenta a maior largura de banda no pico (ressonância) da resposta observado naquele domínio, e que as curvas da MC (mistura de éster celulose $0,45 \mu m$ fig. 30a), EC22 (éster de celulose $0,22 \mu m$, fig. 30d) e EC45 (éster de celulose $0,45 \mu m$ fig. 30b) têm mais de um pico na domínio avaliado. Em geral, as respostas na amplitude MC, EC45 e PF estão na mesma ordem de grandeza. Já a amplitude da EC22 é quase um ordem de

Figura 30: Comparação dos coeficientes de transmissão teórico e experimentais nas camadas caracterizadas

grandeza menor, o que pode ser resultado de uma configuração laminar que ocasiona mais reverberações. Na tabela 8 são resumidas as propriedades estimadas para cada camada pelo modelo teórico do coeficiente de transmissão.

Tendo em conta que a frequência efetiva das camadas para seu uso na construção dos transdutores é a metade da apresentada na tabela 8; isso implica que as frequências a serem usadas nas camadas MC, EC45, PF e EC22 sejam, respectivamente, 0,55, 0,67, 1,12, 0,77 e MHz. Os valores apresentados são próximos aos obtidos por (ALVAREZ-ARENAS, 2004) e (ARENAS, 2002).

As respostas temporais transmitidas através de uma mostra de epóxi (camada de 0,77 cm de espessura) e sem amostra são representadas, respectivamente, pelas linhas azul e vermelha da figura 31a. Deve-se lembrar que esses sinais foram obtidos também usando a montagem experimental apresentada na figura 20. Já a figura 31b mostra os

Tabela 8: Propriedades mecânicas das camadas

Camada	Propriedade					
	$l_{cam} [\mu m]$	$\rho_m [\frac{kg}{m^3}]$	$\nu_m [\frac{m}{s}]$	$Z_a [Rayl]$	$\alpha_\lambda [Np]$	$fr_{\frac{\lambda}{2}} [MHz]$
MC	146	857	329	$2,82 \times 10^5$	0,170	1,11
EC45	126	756	328	$2,48 \times 10^5$	0,118	1,35
PF	109	836	531	$4,44 \times 10^5$	0,116	2,25
EC22	136	545	411	$2,24 \times 10^5$	1,090	1,55
Epóxi	$7,6 \times 10^3$	1300	1550	$2,18 \times 10^6$	0,08	2,25

coeficiente de transmissão experimental e teórico para a camada de epóxi. Ambos coeficientes mostram que a queda de energia entre os picos é baixa, o qual indica que a atenuação desse material é baixa em relação às camadas porosas (tabela 8).

Figura 31: Resposta Mecânica da camada de epóxi

As curvas dos coeficientes de transmissão MC, EC45, EC22 e a camada de epóxi (fig. 31b) mostram as ressonâncias apresentam picos regulares (separados de Δf). O cálculo da espessura usando a expressão $l_{cam1} = \frac{n\lambda}{2} = \frac{nc}{2 \cdot \Delta f}$ é como foi apresentado na seção 3.1. No caso do epóxi, por exemplo, $l_{cam1} = \frac{1550m/s}{2 \cdot 100kHz} = 0,0077m$ é um valor muito próximo da espessura medida na amostra caracterizada (tabela 6).

No caso da camada de aerogel, não foi possível fabricar camadas para caracterização porque o fluxo de CO_2 não foi correto no processo de secagem supercrítico. Isso impediu a síntese da rede de *TEOS*. Devido à espessura das camadas requeridas, o fluxo de CO_2 deve ser mais lento para remover o etanol, evitando as rachaduras e desprendimento da superfície na qual foi despejado.

5.2 Comportamento elétrico e mecânico nas etapas de construção

Nesta seção, será mostrado como o comportamento do sistema sofre alterações devido à adição das camadas de acoplamento acústico. São apresentados gráficos sobre o comportamento elétrico e mecânico de transdutores construídos com cerâmicas puras e piezocompósitos.

5.2.1 Piezocompósito

O comportamento elétrico das cerâmicas antes e depois do processo de confecção do piezocompósito é apresentado na figura 32, são mostradas as curvas experimentais de admitância elétrica normalizada escala logarítmica. Os resultados experimentais são comparados como os resultados teóricos obtidos pelo modelo da impedância elétrica (eq. 2.55). É possível perceber que a largura de banda do elemento ativo é incrementada significativamente, aproximadamente umas 4 vezes para APC855 e 5 vezes para o Pz37. Porém, houve uma queda na frequência de operação, de cerca de 20%.

Figura 32: Respostas elétricas teórica e experimental dos sistemas APC855 e Pz37 puros e piezocompósito $dBs = 20\log_{10}\left(\frac{|Y|}{|Y_{max}|}\right)$

Conforme a figura 32a, a faixa de frequência de operação do piezocompósito de APC855 a -6dB (onde a energia transmitida é a metade da máxima) é 0,32-0,40 MHz. Portanto, essa faixa de frequência permitiu o baixo nível (-25 dBs) de casamento com a espessura de ressonância de 0,55 MHz (a camada MC, tabela 8) que seria a ressonância de $\frac{\lambda}{4}$ mais próxima. Em relação ao piezocompósito obtido a partir do Pz37, esse

apresentou uma faixa de operação entre 0,74-0,95 MHz, o que tornou possível colar a camada PF com espessura sintonizada mais próxima na ressonância de $\frac{1}{4}$ de 1,125 MHz (tabela 8).

Outro resultado que se pode retirar da figura 32 é fator de acoplamento eletromecânico k_t usando as frequências de ressonância f_r e antirressonância f_a , tendo em conta que $k_t^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \frac{1}{\tan \frac{\pi f_r}{2 f_a}}$ (KINO, 1987). Desse modo, os valores de k_t^2 para a cerâmica de APC855 pura e o piezocompósito são, respectivamente, 0,20 e 0,35 similar ao estimado na tabela 9 (eq. 2.55).

Para os piezocompósitos, a frequência de operação foi reduzida em cerca de 20% da frequência de operação da respectiva piezocerâmica pura e a impedância elétrica foi incrementada pela redução de material semiconductor no processo de diluição. Além disso, a maioria dos modos de vibrar do APC855 no estado puro desapareceu no piezocompósito, permanecendo apenas o modo de espessura de 0,375 MHz. Na tabela 9 são apresentados os valores dos coeficientes estimados pelo modelo, ajustando as curvas de $20 \log_{10} \frac{|Y|}{|Y_{max}|}$ teóricas e experimentais. Os coeficientes obtidos neste trabalho estão de acordo com os valores reportados (GONZÁLEZ et al., 2016).

Tabela 9: Propriedades estimadas nos ressonadores piezocerâmicos e piezocompósitos

Material	Propriedade						
	$\beta_{33}^r \left[\frac{Vm}{As} \right]$	$C_{33} \left[\frac{N}{m^2} \right]$	$h_{33} \left[\frac{N}{C} \right]$	ψ_c	k_t^2	$c \left[\frac{m}{s} \right]$	$Z_c [Mrayl]$
APC855 puro	$1,4 \times 10^8 - i6,8 \times 10^5$	$1,3 \times 10^{11} - i6,6 \times 10^8$	$1,4 \times 10^9 - i9,7 \times 10^7$	3,2	0,11	4149	31,3
APC855 comp.	$3,3 \times 10^8 + i4,2 \times 10^7$	$5,5 \times 10^{10} - i7,8 \times 10^9$	$2,7 \times 10^9 - i4,9 \times 10^8$	3,0	0,39	3412	16,6
Pz37 puro	$1,8 \times 10^8 - i3,7 \times 10^7$	$6,8 \times 10^{10} + i1,7 \times 10^9$	$1,9 \times 10^9 - i4,8 \times 10^7$	3,3	0,30	3400	19,0
Pz37 comp.	$5,9 \times 10^8 - i2,5 \times 10^8$	$2,6 \times 10^{10} - i1,6 \times 10^9$	$2,5 \times 10^9 - i3,1 \times 10^9$	1,1	0,32	3000	8,6

Dos valores apresentados, configuração sem camadas passivas, é possível afirmar que o processo de diluição permitiu um maior coeficiente de acoplamento k_t com o ar (condensou-se somente a parte real de k_t).

5.2.2 Adição das camadas

A medição experimental da resposta elétrica (componentes real e imaginário da admitância) foi comparada com os padrões teóricos. Na curva 33a é possível observar o padrão gerado pela relação entre a condutância (G) e susceptância (B). O diagrama de Nyquist (relação entre a parte real e a imaginária da admitância, fig. 33b) mostra que para os três materiais existem respostas dinâmicas com padrão circular, o qual é pró-

Figura 33: Comportamento elétrico G condutância e B susceptância

prio dos sistemas de segunda ordem. Os círculos contidos dentro do círculo principal indicam frequências de ressonância diferentes da ressonância no modo de espessura. Esse efeito é mais pronunciado no APC855 puro (também apresentado na figura 32a) e é suprimido no processo de diluição.

O comportamento antes e depois da adição das camadas passivas é mostrado através das curvas de condutância e susceptância (fig. 34 para APC855 e fig. 35 para Pz37). No caso sem cargas acústicas nos eletrodos, os protótipos sem adição de camadas apresentaram uma largura de operação muito estreita (próximo a 5%) para os materiais puros. Os limites da banda foram determinados usando $(20\log_{10}(0,25) = -12\text{dB})$ do ponto máximo das curvas de condutância (linhas contínuas e pontilhadas vermelhas). No caso dos compósitos, a faixa é maior, sendo 5 vezes maior para o compósito baseado em APC855 e 2 vezes maior para o compósito Pz37, ambos os valores foram obtidos em relação as respectivas larguras de banda dos materiais puros.

Após colar a primeira camada (resina epóxi de espessura $\frac{\lambda}{4}$) houve a geração de um par de picos próximos à frequência central inicial para os quatro materiais ativos (linhas contínuas e pontilhadas azuis das condutâncias). Cada par de picos tem amplitudes similares e posições simétricas com relação ao centro.

A ocorrência dos picos está ligada à ressonância do sistema cerâmica-camada de epóxi nas respectivas frequências. A impedância acústica da camada de resina epóxi não tem o valor ótimo entre o ressonador e o ar, como foi apresentado na linha amarela ou roxa da figura 14a.

Figura 34: Comportamento elétrico (condutância e susceptância) dos protótipos baseados em APC855 puro e piezocompósito

O efeito das duas camadas (epóxi e membrana porosa) sobre os protótipos é apresentado nas mesmas figuras 34 e 35 (condutância) com linhas contínuas e pontilhadas pretas. Observa-se que a adição de camadas porosas mantém um par de picos próximos à frequência de operação das configurações que só têm a camada de epóxi colada. O sistema piezocompósito de Pz37 gerou um padrão diferente na condutância e mais parecido as linhas amarela e vermelha da figura 14b, ou seja, um conjunto de picos mais próximos da ressonância em estado puro e de baixa amplitude. Isso indica que o processo de acoplamento em ar para o compósito Pz37 com duas camadas se aproximou ao proposto no desenho usando esses materiais (epóxi e membrana porosa PF).

As figuras 34c e 35c mostram que a sensibilidade medida entre o pico de ressonância do elemento ativo sem camadas e os vales após o uso das camadas passivas têm uma queda menos pronunciada no caso dos piezocompósitos, sendo 85% no compó-

Figura 35: Comportamento elétrico (condutância e susceptância) dos protótipos baseados em Pz37 puro e piezocompósito

sito de APC855 e 66% no compósito de Pz37, em relação aos piezocerâmicos puros, os quais têm uma queda maior que 90%. Isso é um indício de que os compósitos são mais indicados para acoplamento em ar.

Após a terceira etapa de construção, a faixa da operação dos ressonadores foi incrementada. Os incrementos foram de 3 vezes e 1,5 vezes nos protótipos 1 (APC855 puro) - 3 (Pz37 puro) e nos protótipos 2 (ACP855 compósito) - 4 (Pz37 compósito), respectivamente. Os limites da faixa de operação foram determinados a -12 dB do pico máximo da condutância, o que equivale a $\frac{1}{4}$ da altura máxima do pico das cerâmicas puras. Nos quatro casos, as curvas de susceptância teóricas também são coerentes com o dados experimentais.

Da tabela 10 é possível afirmar que as propriedades estão dentro dos valores esperados de cada componente (LAMBERTI; GIUA; PAPPALARDO, 1987). Além disso, os

Tabela 10: Propriedades usadas no modelo matricial para ajustar as curvas de condutância e susceptância aos dados experimentais obtidos com os protótipos: 1(APC855 puro), 2(APC855 compósito), 3(Pz37 puro) e 4(Pz37 compósito).

Propriedade	Protótipo			
	1	2	3	4
$l_{ea}[mm]$	0,40	0,4	1,45	1,25
$l_{cam1}[mm]$	1,31	1,42	0,72	0,81
$l_{cam2}[\mu m]$	127	135	107	112
$Z_{ea} [Mrayl]$	32,15	17,2	23,8	7,92
$Z_{cam1} [Mrayl]$	2,63	2,72	2,6	2,44
$Z_{cam2} [krayl]$	282,34	313,1	442,38	440,38
$c_{ea} \left[\frac{m}{s} \right]$	4158	3980	3930	2905
$c_{cam1} \left[\frac{m}{s} \right]$	2025	2100	2000	1900
$c_{cam2} \left[\frac{m}{s} \right]$	329	390	580	531
$\epsilon_{33} \left[\frac{C^2}{Nm^2} \right]$	$1,74 \times 10^{-8}$	$3,05 \times 10^{-9}$	$8,23 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-10}$
$e_{33} \left[\frac{C}{m^2} \right]$	795	10	391	74
$C_o[F]$	$2,98 \times 10^{-9}$	$3,38 \times 10^{-10}$	$2,38 \times 10^{-9}$	$6,36 \times 10^{-11}$

valores obtidos para a velocidade de propagação e a impedância acústica dos elementos ativos são próximos aos logrados pelo modelo sem camadas de acoplamento e cargas acústicas (tab. 9), o que demonstra sua equivalência.

5.2.3 Resposta na amplitude

As figuras 36 e 37 mostram os sinais gerados pelos protótipos construídos que foram medidos pelos respectivos transdutores comerciais de frequências de 0,5 e 1 MHz. Essas medições em modo de transmissão-recepção foram feitas no ar com os protótipos construídos antes e após a adição das duas camadas de acoplamento (epóxi e membrana de filtração). Também são apresentadas as respostas em frequência aplicando a transformada de Fourier (FFT) nos sinais medidos.

A figura 36a mostra, no caso do protótipo 1 (APC855 puro), que a amplitude da resposta aumentou quase 3 vezes e a figura 36c, no caso do protótipo 2 (APC855 compósito), que a amplitude permaneceu quase constante. O incremento nulo da amplitude da resposta do protótipo 2 é devido ao uso de uma camada porosa com espessura não sintonizada à primeira frequência de ressonância (370 kHz), como o apresentado nas figuras 32a (linha tracejada) e 36d (linha vermelha). A membrana porosa, disponível no laboratório e empregada no protótipo 2, tinha uma espessura próxima de $146 \mu m$

Figura 36: Sinais medidos no modo transmissão-recepção dos protótipos 1 (APC855 puro) e 2 (APC855 compósito) com e sem adição das camadas de acoplamento acústico

(a) Pulso inserido $1\mu s$, 10 Vpp no Protótipo 1

(b) Resposta na frequência

(c) Pulso inserido $1\mu s$, 10 Vpp no Protótipo 2

(d) Resposta na frequência

(camada MC, tabela 8), cujo valor é menor do que aproximadamente 30% da espessura ideal ($\frac{\lambda}{4}$) definida no projeto entre 180-250 μm (camada ML2 tabela 2).

Do mesmo modo, as figuras 37a e 37c mostram que ocorreu, respectivamente, um aumento da amplitude de 4,5 vezes no protótipo 3 (Pz37 pura) e 4 vezes no protótipo 4 (compósito de Pz37) devido ao uso das camadas de acoplamento. A maior amplitude das ondas transmitidas ao ar ocorreu quando as duas camadas passivas (epóxi e membrana de filtração) tiveram suas espessuras sintonizadas à frequência de operação, ou seja, espessuras $\frac{\lambda}{4}$.

A duração (oscilação remanescente após à aplicação do pulso) dos sinais de resposta dos protótipos 1, 3 e 4 permaneceu quase constante. Isso indica que os valores de Z_a dos materiais passivos usados não foram completamente certos. Poderia-se fazer pequenas alterações de densidade nas camadas de epóxi variando a proporção mássica

Figura 37: Sinais medidos no modo transmissão-recepção dos protótipos 3 (Pz37 puro) e 4 (Pz37 compósito) com e sem adição das camadas de acoplamento acústico

(a) Pulso inserido $0,5\mu s$, 10 Vpp no Protótipo 3

(b) Resposta na frequência

(c) Pulso inserido $0,55\mu s$, 10 Vpp no Protótipo 4

(d) Resposta na frequência

da mistura entre a resina Araldite e o endurecedor Aradur antes do processo de cura.

Dos quatro protótipos, o protótipo 2 (compósito APC855) foi o único que apresentou um incremento maior na resolução axial, ou seja, o sinal de resposta temporal é mais curto em relação ao protótipo sem camadas. Neste caso, os materiais passivos cumprem a função de amortecedores, mas não como camadas de acoplamento acústico.

5.2.4 Pulso-Eco, forma de onda e campo acústico

A resposta obtida para o protótipo 1, operando em modo pulso-eco, é apresentada na figura 38. Somente depois que o sinal de excitação é amortecido, o protótipo 1 é capaz de detectar os ecos. Isso ocorre a uma distância de 6,6 cm da face do transdu-

tor. Nessa posição, o eco se diferencia inteiramente do sinal de excitação. Porém, é possível perceber o eco a 5 cm (fig. 38b linha azul).

Figura 38: Respostas do protótipo 1 (APC855 puro) operando em modo pulso-eco para as seguintes posições do do refletor: a) 6,6 cm e b) 7,4, 6,5 e 5,3 cm

As figura 39a e 39b apresentam as distribuições de pressão em um dado instante ($t = 87\mu s$), respectivamente, para o protótipo 1 (frequência central de 0,4 MHz) e para o transdutor comercial (frequência central de 0,5 MHz). As medições desses campos acústicos foram feitas com o microfone de 3 mm de diâmetro. O transdutor comercial quase não gerou reverberações em resposta à excitação aplicada pelo pulsador pulser/receiver. Entretanto, no caso do protótipo 1, a distribuição das ondas não foi homogênea, devido ao processo de fabricação artesanal, que resultou em camadas ligeiramente irregulares e camadas não uniformes de cola.

Figura 39: Distribuição de pressão no instante $t = 87,5\mu s$

Os campos acústicos gerados pelo protótipo 1 (0,4 MHz e diâmetro 30 mm) e pelo transdutor comercial (Ultran 0,5 MHz, diâmetro 22 mm) são apresentados nas figuras 40a e 40b, respectivamente. O campo resultou do valor absoluto das componentes reais e imaginárias da FFT do sinal temporal em cada ponto do espaço. Foi verificado que ao redor do 0,4 MHz, os padrões são parecidos, mas não exatamente iguais. Isso ocorreu pela diferença de geometria dos emissores e pela banda larga de resposta do transdutor comercial.

Figura 40: Campo acústico experimental normalizado

As linhas transversais do campo possivelmente resultam das reflexões geradas pelo receptor ou por seu suporte, que viajam até outros obstáculos, retornando ao receptor (microfone). Elas são mais pronunciadas no protótipo 1 devido ao maior número de reverberações que ele gera na emissão. Por outro lado, não é possível ver com clareza o padrão do campo nas proximidades do emissor (15 mm) devido ao diâmetro do receptor (microfone *Bruel & Kjaer* de diâmetro 3mm) ser maior que o comprimento de onda ($\lambda \simeq 0,8mm$). Porém, a posição do lóbulo principal é visível nos dois casos, conforme apresentado nas distribuições axial e transversal de pressão, respectivamente, nas figuras 41a e 41b. As medições da distribuição transversal foi feita a uma distância 30 mm do emissor (fig. 41b).

5.2.5 Comparação campo acústico FEM e o experimental

A comparação entre os campos acústicos do protótipo 1 simulado pelo método de elementos finitos e medido experimentalmente é apresentada na figura 42. Na modelagem do transdutor para acoplamento em ar, o material predefinido no software

Figura 41: Distribuições axial (a) e transversal em $Y = 30$ mm dos transdutores protótipo 1 (APC855 puro) e comercial (Ultran 0,5 MHz)

COMSOL para o elemento ativo foi empregado o PZT5A, pela grande similitude das propriedades mecânicas e elétricas com a cerâmica APC855. Já para as camadas de acoplamento, o material da camada 1 foi configurado com $C_{33} = 4$ GPa, $\nu = 0,28$ e $\rho = 1300 \frac{kg}{m^3}$ e o material da camada 2, $C_{33} = 0,1$ GPa, $\nu = 0,25$ e $\rho = 850 \frac{kg}{m^3}$. Para o meio de propagação, foram usadas as propriedades padrão do ar. A atenuação inserida no modelo para o ar foi $\alpha = 25 \frac{Np}{m}$ e as atenuações das camadas 1 e 2 foram retiradas da tabela 8.

Embora o padrão entre os campos simulado e experimental não seja completamente certo, existe uma relação entre as regiões de alta e baixa pressão. A divergência poderia estar ligada pelo lado experimental devida a varias causas: 1) tamanho do receptor (3 mm) ser maior que o comprimento da onda $\lambda = 0,8mm$, diminuindo a resolução do campo; 2) reverberações entre a fonte emissora (protótipo) e o suporte do receptor evidenciadas, como linhas transversais, ou seja, paralelas à superfície emissora (também visíveis na figura 40a); 3) assimetria nas espessuras das camadas passivas. Enquanto ao modelo numérico, embora as formas geométricas e estruturais estejam inseridas de modo certo, a natureza porosa da segunda camada não foi emulada, o qual poderia mudar o padrão de emissão.

A figura 43 mostra as distribuições de pressão normalizadas no eixo axial e transversal para o modelo numérico e os dados experimentais. É possível afirmar que, embora os resultados do modelo não se ajustam completamente aos dados experimentais, a posição dos pontos de mínima pressão experimental são identificados no eixo

Figura 42: Comparação entre o campo acústico obtido pelo MEF e o medido a 395 kHz

axial pelo MEF, os perfis de pressão transversal foram obtidos a 15 mm da superfície emissora. Isso indica que a restrição do deslocamento radial tem alta relevância na distribuição da pressão. É importante lembrar que os resultados teórico ou experimental não apresentam as regiões conhecidas como campo próximo ou distante próprias do modelo de pistão plano (fig. 17b).

Figura 43: Comparação das distribuições axial (a) e transversal (em $Y=15$ mm) (b) obtidas pelo MEF e com dados experimentais

5.3 Protótipos com camadas de aerogel

Ao se extrair as cerâmicas com camada de aerogel dos moldes, a estrutura da camada foi danificada. A aderência das camadas se mostrou muito fraca em todas as amostras e houve rachaduras após a secagem, o que não garantiu a homogeneidade da superfície, resultando em um alto grau de fragilidade (fig. 44). Acredita-se que as rachaduras tenham sido provocadas principalmente pela umidade do ar.

A exposição das camadas do aerogel à umidade do ar foi, provavelmente, a causa das rachaduras. Ao se tratar de um material altamente hidrofílico, a rede de TEOS foi presumivelmente preenchida de modo não homogêneo com água, deixando setores mais ou menos densos com altas tensões mecânicas residuais. Essa dificuldade pode ser diminuída usando reagente como o TMOS, o qual rejeita as moléculas de água de sua estrutura após o processo de secagem supercrítica.

É importante gerar a maior área de contato como o elemento ativo para maximizar a aderência do material sintetizado, e assim, evitar a descolagem posterior.

Figura 44: Fotos das camadas de aerogel sintetizadas após a secagem

5.4 Discussão

Os resultados apresentados em cada uma das seções do capítulo 5 mostraram o aumento do coeficiente de transmissão $|T_I|$ e da largura de banda (resposta elétrica)

das cerâmicas piezelétricas puras, dos piezocompósitos e dos transdutores protótipos para acoplamento em ar com duas camadas de acoplamento passivas, fazendo uma comparação com os respectivos modelos teóricos. Tais aumentos, na transmissão e na banda do transdutor, permitiram a detecção de um obstáculo sólido plano posicionado em frente do transdutor, entre 50 e 150 mm, usando ar como meio de propagação. Dessa maneira, é abordado o último dos objetivos específicos propostos neste trabalho, que tratou da comparação da largura de banda, sensibilidade e resolução axial dos transdutores com os modelos teóricos.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Foi apresentado o projeto, a fabricação e a caracterização de transdutores piezocerâmicos para acoplamento em ar. Os parâmetros de projeto foram usados na escolha ótima das espessuras das camadas, do tipo de material (impedância acústica) e da quantidade de camadas passivas (acoplamento acústico), permitindo a máxima transmissão de energia entre o elemento ativo e o ar e aumentando a largura de banda. Além disso, foram propostos critérios para a escolha das camadas de acoplamento acústico e do tipo de material ativo, usando caracterizações acústica e elétrica dos mesmos. Os protótipos construídos neste trabalho podem ser usados no modo de emissão, recepção ou pulso-eco com frequências próximas de 0,5 e 1 MHz.

As caracterizações dos protótipos construídos demonstraram que o processo de diluição dos elementos ativos ou a adição dos elementos passivos sobre seles geram um incremento significativo na largura de banda do transdutor. Os resultados do comportamento eletromecânico dos piezocompósitos fabricados a partir de cerâmicas puras (APC855 de 0,5 MHz e Pz37 de 1 MHz) mostraram que houve aumento de 4 a 5 vezes na banda de frequências (-6dB). Além disso, houve uma redução na frequência central de 25% para o APC855 e de 10% para o Pz37. Esse efeito não possibilitou o casamento de impedância acústica correto entre as camadas de acoplamento disponíveis para o piezocompósito de APC855. O modelo matricial do transdutor permitiu estimar as respostas elétricas e as propriedades mecânicas e elétricas de todos os componentes dos protótipos, logrando o bom nível de ajuste.

Entre as camadas porosas caracterizadas, a celulose mista (porosidade de 0,45 μm) e a fluoreto de polivinilideno foram escolhidas, respectivamente, para frequências de 0,5 e 1 MHz, permitindo o casamento com as cerâmicas puras e os piezocompósitos. Essas membranas foram coladas sobre uma camada de araldite (espessura $\frac{1}{4}$) nos pro-

tótipos de APC855 puro, Pz37 puro e respectivos compósitos.. Embora as camadas caracterizadas tenham apresentado vários picos de ressonância, não foi possível sintonizar de modo certo à frequência de operação do piezocompósito de APC855 com a camada porosa mais próxima (MC), motivo pelo qual, o protótipo baseado nesse material não apresentou incremento na amplitude do sinal emitido. O modelo teórico usado no cálculo do coeficiente de transmissão permitiu simular o comportamento experimental da transmissão de energia através da membrana porosa e, assim, estimar a atenuação, a impedância acústica e a espessura das camadas passivas.

O uso de duas camadas passivas consecutivas de espessura $\frac{\lambda}{4}$ permitiu incrementar significativamente a faixa da resposta dos protótipos, além de incrementar a amplitude do sinal da resposta no domínio temporal e da frequência. Para o acoplamento em ar, é fundamental que a espessura da segunda camada fique sintonizada na frequência de operação do elemento ativo.

Os elementos ativos mais adequados para o acoplamento em ar são os piezocompósitos devido à menor diminuição na sensibilidade ao serem combinados com as camadas de acoplamento.

O teste no modo pulso-eco mostrou que o protótipo baseado em APC855 puro permitiu diferenciar ecos gerados por obstáculos posicionados entre 53 mm e 150 mm do emissor. O mapeamento do campo acústico permitiu fazer uma comparação quantitativa do protótipo 1 com um transdutor comercial de geometria similar. Mostrou-se que é necessário um receptor de geometria menor para se observar os padrões de interferência.

6.2 Trabalhos futuros

É preciso continuar os testes na secagem supercrítica com o objetivo de se obter camadas de aerogel diretamente sobre as cerâmicas piezelétricas, com mais qualidade e aderência. Deve-se modificar as concentrações dos reativos ou adicionar outros reagentes como a tetrametilortossilicato (TMOS) com propriedade hidrofóbica, que evitaria rachaduras resultantes da umidade na estrutura.

Além dos materiais, o processo de manufatura de transdutores para acoplamento em ar deve ser padronizado. Desse modo, os dispositivos resultantes serão fabricados com mais facilidade, terão melhor qualidade e desempenho.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ-ARENAS, T. E. G. Acoustic impedance matching of piezoelectric transducers to the air. *IEEE Transactions on ultrasonic, ferroelectrics and frequency control*, p. 625, 2004.
- ÁLVAREZ-ARENAS, T. E. G. Simultaneous determination of the ultrasound velocity and the thickness of solid plates from the analysis of thickness resonances using air-coupled ultrasound. *Ultrasonics*, Elsevier, v. 50, n. 2, p. 104–109, 2010.
- ALVAREZ-ARENAS, T. E. G. Air-coupled piezoelectric transducers with active polypropylene foam matching layers. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 5, p. 5996–6013, 2013.
- ÁLVAREZ-ARENAS, T. G. Acoustic impedance matching of piezoelectric transducers to the air. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, IEEE, v. 51, n. 5, p. 624–633, 2004.
- ÁLVAREZ-ARENAS, T. G.; MONTERO, F. Materiales y técnicas para el acoplamiento mecánico óptimo de piezocerámicas al aire. *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio*, v. 41, p. 16–21, 2002.
- ARENAS, F. d. E. T.E.Gómez Álvares. Materiales y técnicas para el acoplamiento mecánico óptimo de piezocerámicas en aire. p. 17–18, 2002.
- ENSMINGER, L. J. B. D. *Ultrasonics Fundamentals, Technologies and Applications*. third edition. [S.l.: s.n.], 2012. 72-73 p.
- GACHAGAN, A. et al. Characterization of air-coupled transducers. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, IEEE, v. 43, n. 4, p. 678–689, 1996.
- GÓMEZ, T. E. et al. Fabrication and characterization of silica aerogel films for air-coupled piezoelectric transducers in the megahertz range. In: IEEE. *Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings. 2002 IEEE*. [S.l.], 2002. v. 2, p. 1107–1110.
- GÓMEZ, T. E.; GONZALEZ, B.; MONTERO, F. Paper characterization by measurement of thickness and plate resonances using air-coupled ultrasound. In: IEEE. *Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings. 2002 IEEE*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 865–868.
- GONZÁLEZ, A. M. et al. Revisiting the characterization of the losses in piezoelectric materials from impedance spectroscopy at resonance. *Materials*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 2, p. 72, 2016.

KELLY, S. P.; HAYWARD, G.; ÁLVAREZ-ARENAS, T. G. Characterization and assessment of an integrated matching layer for air-coupled ultrasonic applications. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, IEEE, v. 51, n. 10, p. 1314–1323, 2004.

KINO, G. S. *Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing*. [S.l.: s.n.], 1987. 5996–6013 p.

KINSLER, L. E. *Fundamentals of Acoustics*. [S.l.]: Publication Services, Inc, 2000. 150-154 p.

KOCBACH, J. Finite element modeling of ultrasonic piezoelectric transducers. *PhD, University of Bergen*, 2000.

LAMBERTI, N.; GIUA, P.; PAPPALARDO, M. Modello matriciale e suo impiego nella ottimizzazione della risposta impulsiva del trasduttore multielemento. *Rapporto scientifico*, v. 61, 1987.

MELLINGER, A. Dielectric resonance spectroscopy: a versatile tool in the quest for better piezoelectric polymers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 10, n. 5, p. 842–861, 2003.

OSPINA, J. F. P. *Construcción y evaluación de un multitransductor de focalización híbrida basado en Ferroelectretos para inspección de materiales sin contacto*. [S.l.: s.n.], 2012.

SMIRNOVA, I.; GURIKOV, P. Aerogel production: Current status, research directions, and future opportunities. *The Journal of Supercritical Fluids*, Elsevier, v. 134, p. 228–233, 2018.

SMIRNOVA, I.; SUTTIRUENGWONG, S.; ARLT, W. Aerogels: tailor-made carriers for immediate and prolonged drug release. *KONA Powder and Particle Journal*, Hosokawa Powder Technology Foundation, v. 23, p. 86–97, 2005.

WEIGHT, J. Ultrasonic beam structures in fluid media. *The Journal of the Acoustical Society of America*, ASA, v. 76, n. 4, p. 1184–1191, 1984.