

FABRÍCIO OISHI GRIGOLIN

DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTORES DE ULTRASSOM COM
PEQUENOS DISCOS PARA EMISSÃO EM AR

SÃO PAULO

2012

FABRÍCIO OISHI GRIGOLIN

DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTORES DE ULTRASSOM COM
PEQUENOS DISCOS PARA EMISSÃO EM AR

TRABALHO DE FORMATURA
APRESENTADO À ESCOLA
POLITÉCNICA PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE ENGENHEIRO

SÃO PAULO
2012

FABRÍCIO OISHI GRIGOLIN

DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTORES DE ULTRASSOM COM
PEQUENOS DISCOS PARA EMISSÃO EM AR

TRABALHO DE FORMATURA
APRESENTADO À ESCOLA
POLITÉCNICA PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE ENGENHEIRO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
ENGENHARIA MECATRÔNICA

ORIENTADOR:
PROF. DR. FLÁVIO BUIOCHI

SÃO PAULO

2012

Grigolin, Fabrício Oishi

Desenvolvimento de transdutores de ultrassom com pequenos discos para emissão em ar / F.O. Grigolin. -- São Paulo, 2012.

103 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Ultrassom 2. Atuadores piezoelétricos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

*Aos meus pais,
José e Sandra.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, **Prof. Dr. Flávio Buiochi**, pelas importantes instruções fornecidas e pelo tempo disponibilizado para a condução deste trabalho, além de inspirar grande confiança durante sua realização.

Agradeço aos integrantes das salas MZ14 e MT22, principalmente **Victor T., Orlando C. F., Marcelo H. G. e Marco Aurélio B. A.** do laboratório de ultrassom, e **Felipe L. S.**, do laboratório de otimização e pela ajuda direta no trabalho, através de ideias e materiais de apoio.

Agradeço a meus pais e irmão que durante toda a graduação me apoiaram e me motivaram para que ao final este trabalho fosse realizado.

Agradeço aos meus amigos e familiares que indiretamente me ajudaram na conclusão deste trabalho de formatura.

“O sábio envergonha-se dos seus defeitos,

mas não se envergonha de corrigi-los”

(Confúcio)

RESUMO

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso consiste em se obter um transdutor piezelétrico de ultrassom que apresente boa eficiência na emissão de ondas acústicas para o ar. Foram construídos dois transdutores, cada um constituído de uma cerâmica piezelétrica colada num disco, além dos eletrodos fixados na cerâmica. Tal disco possui ranhuras na face de radiação e na face oposta está fixada a cerâmica. Tais transdutores são excitados por uma salva de sinais senoidais ou em excitação contínua, com frequência em torno de 190kHz. O estudo teórico foi feito utilizando o método dos elementos finitos (MEF) através do software Ansys, além do software Matlab para a criação de rotinas para análises de resultados e para realização da otimização paramétrica. Para melhorar as características do transdutor foram escolhidos o material e a geometria do disco, além de escolhida a cerâmica piezelétrica adequada. Após essas definições foi feita uma otimização paramétrica da geometria do disco. A parte experimental consistiu em construir protótipos de transdutores otimizados e não otimizados e compará-los. Para a comparação foram realizadas verificações de desempenho, calculando a diretividade do feixe acústico, a impedância elétrica e deslocamentos normais à superfície de radiação. Ao final, também foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos com os modelos teóricos e os medidos experimentalmente.

Palavras-chave: Transdutor, ultrassom, piezelétrico, emissão em ar, elementos finitos.

ABSTRACT

The aim of this work is to obtain an ultrasound piezoelectric transducer that presents good efficiency for the transmission of acoustic waves into the air. Two transducers were constructed. Each transducer is composed of a piezoelectric ceramic glued to a disc, and electrodes connected to the ceramics. This disc is grooved on the face of radiation and the opposite face is in contact with the ceramic. These transducers are driven by bursts or continuous excitation for frequencies around 190kHz. The theoretical study is done using the finite element method (FEM) using the software ANSYS. Matlab software was used for creating routines for analysis of results and performance of parametric optimization. To improve the characteristics of the transducer, material and geometry of the disc and the appropriate piezoelectric ceramics were chosen. After these definitions, a parametric optimization of the disk geometry was done. The experimental part consists of building prototypes of optimized and non-optimized transducers and comparing their performance. For comparison, the performance is checked by calculating the acoustic beam directivity, the electrical impedance and the displacements normal to the radiation surface. Finally, the results of theoretical models are compared with the experimental measurements.

Key-words: transducer, ultrasound, piezoelectric, air coupling, finite element.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	3
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
3.1	Placas Radiantes Vibrando no Modo de Flexão	4
3.2	Acústica	7
3.2.1	Definições	7
3.2.2	Equações da Elasticidade	8
3.2.3	Velocidade de Propagação na Cerâmica Piezelétrica	10
3.2.4	Impedância Acústica	11
3.2.5	Campo Acústico	11
3.3	Piezoelectricidade	13
3.4	Método dos Elementos Finitos (MEF)	16
3.4.1	MEF Estrutural	17
3.4.2	MEF Piezelétrico	18
3.4.3	Análise Modal	20
3.4.4	Análise Harmônica	20
3.5	Otimização	21
3.5.1	Conceitos Básicos de Otimização	22
3.5.2	Algoritmos de Otimização	23
4	METODOLOGIA	26
5	MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	27

5.1	Modelagem utilizando o ANSYS	27
5.2	Modelagem da cerâmica.....	28
5.3	Modelagem do Disco Emissor.....	29
5.4	Cerâmica Piezelétrica	30
5.4.1	Análise de convergência e frequências de ressonância	30
5.4.2	Influência da espessura da cerâmica na frequência de ressonância e velocidade de propagação.....	32
5.5	Disco emissor	33
5.5.1	Escolha do material.....	33
5.5.2	Forma de fixação do transdutor	35
6	RESULTADOS TEÓRICOS	38
6.1	Caracterização da cerâmica piezelétrica.....	38
6.1.1	Dados Experimentais	39
6.1.2	Análise de Sensibilidade	40
6.1.3	Aproximação inicial dos valores das constantes.....	41
6.1.4	Refinamento da solução.....	42
6.2	Protótipo Inicial	45
6.3	Protótipo Otimizado	47
6.3.1	Otimização Paramétrica	47
6.3.2	Parâmetros do algoritmo genético	54
6.3.3	Descrição do algoritmo	56
7	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59
7.1	Fabricação dos Transdutores	59
7.2	Curvas de Impedância Elétrica	60
7.3	Deslocamentos da Superfície do Transdutor	63
7.4	Medição da amplitude dos sinais emitidos.....	69

7.5	Diretividade	74
8	CONCLUSÃO	77
9	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	79
	ANEXO A	81
	ANEXO B	82

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: PLACA SEM RANHURAS VIBRANDO NO MODO DE FLEXÃO (MOON, 2009).....	4
FIGURA 2: PLACA COM RANHURAS PARA COMPENSAR A DIFERENÇA DE FASE (MOON, 2009).....	5
FIGURA 3: TRANSDUTOR COM RANHURAS EM AMBAS AS FACES (BUIOCHI, 2008)	5
FIGURA 4: TRANSDUTOR COM PLACA EMISSORA RETANGULAR E RANHURAS EM AMBAS AS FACES (JUAREZ, 2010).	6
FIGURA 5: ONDA LONGITUDINAL COM COMPRIMENTO DE ONDA REPRESENTADO ENTRE DUAS ZONAS DE COMPRESSÃO (PORTAL GEF-UFSM).....	7
FIGURA 6: CERÂMICA PIEZELÉTRICA VIBRANDO NO PRIMEIRO MODO RADIAL. O ARCO INDICA A AMPLITUDE DOS DESLOCAMENTOS.	11
FIGURA 7: MODELO DE PISTÃO PLANO (KINSLER, 1982).	12
FIGURA 8: AMPLITUDE DE PRESSÃO AXIAL PARA UM PISTÃO PLANO CIRCULAR COM $K_A = 8\pi$. A LINHA SÓLIDA PROVÉM DE CÁLCULO EXATO DA TEORIA E A LINHA TRACEJADA É A ASSÍNTOTA ($P = (AP_M CV_0 K_A)/(2R)$) NO CAMPO DISTANTE (KINSLER, 1982).....	13
FIGURA 9: EXPLICAÇÃO SIMPLIFICADA DO EFEITO PIEZELÉTRICO: (A) MOLÉCULA NEUTRA; (B) DIPOLO FORMADO PELA APLICAÇÃO DE FORÇA EXTERNA; (C) POLARIZAÇÃO NA SUPERFÍCIE DO MATERIAL PIEZELÉTRICO (ARNAU, 2008).	14
FIGURA 10: (A) ESTRUTURA A SER RESOLVIDA PELO MEF; (B) ESTRUTURA DISCRETIZADA, COM RESTRIÇÕES E CARREGAMENTOS (LOGAN, 2007).	16
FIGURA 11: RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA IMPEDÂNCIA ELÉTRICA (Z), COM INDICAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA E ANTIRRESSONÂNCIA.....	21
FIGURA 12: FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO GENETICO.	25
FIGURA 13: GEOMETRIA DO DISCO DE MATERIAL PIEZELÉTRICO.	28
FIGURA 14: MODELO AXISSIMÉTRICO DE TRANSDUTOR DISCRETIZADO EM ELEMENTOS, COM RESTRIÇÕES E APLICAÇÃO DE TENSÃO.'U' INDICA AS RESTRIÇÕES DOS GRAUS DE LIBERDADE EM VERMELHO, 'VOLT' A TENSÃO ELÉTRICA EM CADA NÓ EM VERDE E 'CP' OS NÓS ACOPLADOS EM AZUL.	29
FIGURA 15: VALORES DE FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E VELOCIDADE DA ONDA VARIANDO COM A DISCRETIZAÇÃO PARA O DISCO 1.	31

FIGURA 16: VALORES DE FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E VELOCIDADE DA ONDA VARIANDO COM A DISCRETIZAÇÃO PARA O DISCO 2	31
FIGURA 17: VALORES DE FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E VELOCIDADE DA ONDA VARIANDO COM A DISCRETIZAÇÃO PARA O DISCO 3	32
FIGURA 18: INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO DIÂMETRO-ESPESSURA NA VELOCIDADE DA ONDA NA CERÂMICA	33
FIGURA 19 SYNTACTIC FOAM: FREQ = 92,55kHz; R = 32mm; H = 3,5mm;	34
FIGURA 20: TITÂNIO: FREQ = 200,5kHz; R = 34,1mm; H = 3mm;	34
FIGURA 21: ALUMÍNIO: FREQ = 200,06kHz; R = 34mm; H = 3 mm;	35
FIGURA 22: PRIMEIRO MODO DE FIXAÇÃO: DISCO COM DEGRAU E REPRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	36
FIGURA 23: SEGUNDO MODO DE FIXAÇÃO: DISCO ENGASTADO NA LINHA CENTRAL DA LATERAL.	36
FIGURA 24: TERCEIRO MODO DE FIXAÇÃO: DISCO ENGASTADO EM TODA A LATERAL	36
FIGURA 25: DESLOCAMENTO DA SUPERFÍCIE RADIANTE DE UM DISCO PLANO.	37
FIGURA 26: GRÁFICO DA SENSIBILIDADE DA CONSTANTE ELÁSTICA C44.....	40
FIGURA 27: ERRO NA COMPARAÇÃO ENTRE OS PICOS DAS CURVAS TEÓRICAS E EXPERIMENTAL DE CONDUTÂNCIA (PÉREZ, 2010).	42
FIGURA 28: FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE DE CARACTERIZAÇÃO DA CERÂMICA.	43
FIGURA 29: COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS EXPERIMENTAL E SIMULADA DE CONDUTÂNCIA (ACIMA) E DE RESISTÊNCIA (ABAIXO).	44
FIGURA 30: SIMULAÇÃO DO PROTÓTIPO INICIAL.....	46
FIGURA 31: CURVA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA DO PROTÓTIPO INICIAL.....	46
FIGURA 32: DISCO EMISSOR: (A) FACE DE RADIAÇÃO COM RANHURAS E (B) FACE POSTERIOR ..	47
FIGURA 33: TRANSDUTOR E DEFINIÇÕES DAS RANHURAS NA FACE EMISSORA (D_I) E NA FACE OPOSTA (DB_I) E ESPESSURA DAS RANHURAS NA FACE OPOSTA (HB).	48
FIGURA 34: DEFINIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DE CADA ELEMENTO; SETAS AMARELAS INDICAM DESLOCAMENTOS NEGATIVOS E SETAS VERMELHAS, DESLOCAMENTOS POSITIVOS.....	48
FIGURA 35: SIMULAÇÃO DO TRANSDUTOR COM RANHURAS NA FACE FRONTAL, COM FREQUÊNCIA DE 197,4kHz	50

FIGURA 36: SIMULAÇÃO DO TRANSDUTOR COM RANHURAS EM AMBAS AS FACES, COM FREQUÊNCIA DE 190,9KHz.....	52
FIGURA 37: SIMULAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO FINAL DO TRANSDUTOR, COM FREQUÊNCIA DE 188,4KHz.....	53
FIGURA 38: CURVA DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA DO TRANSDUTOR OTIMIZADO. A FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DO MODO DESEJADO É DE 188,4 KHz.....	53
FIGURA 39: DISCO EMISSOR DO TRANSDUTOR OTIMIZADO: (A) FACE POSTERIOR, (B) FACE DE RADIAÇÃO.....	54
FIGURA 40: FLUXOGRAMA EXEMPLIFICANDO O ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO.....	58
FIGURA 41: TRANSDUTOR MONTADO: (A) FACE POSTERIOR, (B) FACE DE EMISSÃO.....	60
FIGURA 42: MONTAGEM DO TRANSDUTOR NO IMPEDÔMETRO FASORIAL.....	61
FIGURA 43: COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA SIMULADA E EXPERIMENTAL DO TRANSDUTOR NÃO OTIMIZADO. PARA O RESULTADO EXPERIMENTAL FOI MOSTRADA A CURVA DE FASE DA IMPEDÂNCIA ELÉTRICA.....	61
FIGURA 44: COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA SIMULADA E EXPERIMENTAL DO TRANSDUTOR OTIMIZADO.....	62
FIGURA 45: MONTAGEM DO SISTEMA PARA MEDAÇÃO DE DESLOCAMENTOS NA SUPERFÍCIE DO TRANSDUTOR.....	64
FIGURA 46: DIAGRAMA DE BLOCOS COM AS LIGAÇÕES ENTRE OS EQUIPAMENTOS.....	64
FIGURA 47: COMPARAÇÃO ENTRE OS DESLOCAMENTOS NOS MODELOS SIMULADO E EXPERIMENTAL DO TRANSDUTOR NÃO OTIMIZADO. PARA MELHOR VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS, OS DESLOCAMENTOS SIMULADOS ESTÃO 10 VEZES MENORES.....	66
FIGURA 48: COMPARAÇÃO ENTRE OS DESLOCAMENTOS NOS MODELOS SIMULADO E EXPERIMENTAL DO TRANSDUTOR OTIMIZADO. PARA MELHOR VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS, OS DESLOCAMENTOS SIMULADOS ESTÃO 10 VEZES MENORES.....	67
FIGURA 49: COMPARAÇÃO ENTRE OS DESLOCAMENTOS DA SUPERFÍCIE DO TRANSDUTOR NÃO OTIMIZADO SIMULADO E EXPERIMENTAL COM A CONSTANTE DE AMORTECIMENTO CORRIGIDA PARA 1,6E-9.....	68
FIGURA 50: COMPARAÇÃO ENTRE OS DESLOCAMENTOS DA SUPERFÍCIE DO TRANSDUTOR OTIMIZADO SIMULADO E EXPERIMENTAL COM A CONSTANTE DE AMORTECIMENTO CORRIGIDA PARA 1,6E-9.....	69
FIGURA 51: MONTAGEM DO SISTEMA DE MEDAÇÃO.....	70

FIGURA 52: DIAGRAMA DE BLOCOS COM AS LIGAÇÕES ENTRE OS EQUIPAMENTOS PARA A MEDIÇÃO DAS AMPLITUDES DOS SINAIS.....	71
FIGURA 53: COMPARAÇÃO ENTRE OS SINAIS DOS TRANSDUTORES OTIMIZADO E NÃO OTIMIZADO.	72
FIGURA 54: SINAL <i>BURST</i> DE 20 CICLOS ENVIADO PELO TRANSDUTOR NÃO OTIMIZADO.....	72
FIGURA 55: SINAL <i>BUSRT</i> DE 20 CICLOS ENVIADO PELO TRANSDUTOR OTIMIZADO.....	73
FIGURA 56: ESQUEMA DA MEDIÇÃO DA DIRETIVIDADE.....	74
FIGURA 57: SINAIS OBSERVADOS PARA O TRANSDUTOR NÃO OTIMIZADO.....	75
FIGURA 58: SINAIS OBSERVADOS PARA O TRANSDUTOR OTIMIZADO.....	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PARÂMETROS DOS DISCOS E DA CERÂMICA	37
TABELA 2: RESULTADOS PARA O ALUMÍNIO	38
TABELA 3: VALORES INICIAIS DOS PARÂMETROS.....	41
TABELA 4: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NOS MODOS DE VIBRAR ('-' INDICA SEM INFLUÊNCIA)	41
TABELA 5: VALORES DAS CONSTANTES APÓS A CARACTERIZAÇÃO.	44
TABELA 6: DIÂMETROS NODAIS DO DISCO SEM RANHURAS.	45
TABELA 7: POSIÇÃO DAS RANHURAS.	45
TABELA 8: RESULTADO APÓS A PRIMEIRA OTIMIZAÇÃO.	50
TABELA 9: RESULTADO APÓS OTIMIZAÇÃO DAS RANHURAS NA FACE OPOSTA.....	51
TABELA 10: CONFIGURAÇÃO FINAL DAS RANHURAS NA FACE DE RADIAÇÃO.	52
TABELA 11: CONFIGURAÇÃO FINAL DAS RANHURAS NA FACE OPOSTA.....	52
TABELA 12: PARÂMETROS PADRÃO DO ALGORITMO GENÉTICO DO MATLAB.....	54
TABELA 13: VALORES FINAIS DOS PARÂMETROS DO ALGORITMO GENÉTICO.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PZT Titanato Zirconato de Chumbo

MEF Método dos Elementos Finitos

AG Algoritmo Genético

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_o	comprimento de onda
c	velocidade de propagação da onda sonora
f	frequência da onda
T_o	período da onda
\vec{r}	vetor posição da partícula
\vec{u}	vetor deslocamento da partícula
\vec{v}	vetor velocidade da partícula
ρ	massa específica
\mathbf{T}	tensor de tensões
\mathbf{S}	tensor de deformações
c	tensor de rigidez
$\lambda \ e \ \mu$	constantes de Lamé
dc	diâmetro do disco da cerâmica piezelétrica
hc	espessura do disco da cerâmica piezelétrica
d	diâmetro do disco amplificador de deslocamento
Z	impedância acústica
φ	potencial de velocidade
I	intensidade da onda
ϵ_0	permisividade elétrica do vácuo
\mathbf{D}	vetor de deslocamento elétrico

E	vetor campo elétrico
e	tensor de coeficientes piezelétricos
c^E	tensor de rigidez medido a campo elétrico constante
ϵ^S	tensor de permissividade elétrica medido a deformação constante
M_{UU}	matriz de massa
K_{UU}	matriz de rigidez
C_{UU}	matriz de amortecimento
U	vetor de deslocamentos nos nós da malha de MEF
u	função interpolada dos deslocamentos
N_U	vetor função de forma de deslocamento
F	forças mecânicas
α	coeficiente de amortecimento de Rayleigh para massa
β	coeficiente de amortecimento de Rayleigh para rigidez
Φ	potencial elétrico
$K_{U\Phi}$	matriz de acoplamento elétrico
$K_{\Phi\Phi}$	matriz de rigidez dielétrica
N_Φ	vetor função de forma do potencial elétrico
Q	carga elétrica
I	corrente elétrica
Z	impedância elétrica
R	resistência elétrica
X	reatância elétrica

G	condutância elétrica
B	susceptância elétrica
j	número imaginário
A_d	amplitude de deslocamento do transdutor
ω	frequência angular de excitação
U_m	sensibilidade do sensor
V_{pp}	tensão pico-a-pico

1 INTRODUÇÃO

Ultrassom é a designação de uma onda acústica que não é acessível à percepção humana, com frequências acima de 20 kHz. Duas descobertas do século 19 tiveram grande influência no desenvolvimento da tecnologia: o efeito piezelétrico direto, pelos irmão Jacques e Pierre Curie, em 1880, e a magneto estrição, por James Prescott Joule, em 1847. Tais descobertas permitiram o desenvolvimento dos transdutores de ultrassom (Kuttruff, 1991).

Transdutores piezelétricos são dispositivos capazes de prover uma resposta mecânica em relação a uma excitação elétrica e, inversamente, uma resposta elétrica em relação a uma excitação mecânica. Materiais piezelétricos são muito utilizados para a geração de ondas ultrassônicas, em que uma cerâmica piezelétrica é excitada eletricamente e gera vibrações mecânicas emitindo ondas para o meio. Os transdutores de ultrassom piezelétricos são normalmente utilizados para emissão em líquidos, sólidos ou ar. Apresentam aplicações variadas, como perfuração, atomização, sonoluminescência, secagem, emulsões, decapagem (Cheeke, 2002). A utilização de transdutores de ultrassom de baixa potência para emissão em ar destina-se principalmente a detecção de objetos, medição de distâncias e ensaios não destrutivos (como a inspeção de placas de materiais compósitos aplicados na indústria aeronáutica).

O desenvolvimento de transdutores de ultrassom para acoplamento em gases deve ser tratado de forma distinta aos transdutores para emissão em sólidos ou líquidos. Há uma grande dificuldade de se trabalhar com transdutores para emissão em ar devido ao fato desse meio apresentar sua impedância acústica muito baixa e absorção acústica alta, provocando ineficiência na transferência de energia para o meio, como apresentado por Juarez et.al, 2002.

Existem alternativas para o desenvolvimento de transdutores para emissão em ar. Uma delas é utilizar o atuador diretamente para emissão de ultrassom, que pode ser, entre outros, jatos de gás, que possuem baixa eficiência; ou atuadores eletromagnéticos, magnetoestrictivos, que são emissores sólidos vibrantes, porém não conseguem atingir grandes amplitudes de vibração (Juarez *et. al*, 1978).

Um tipo de transdutor adequado para emissão em ar são os transdutores constituídos de placas com ranhuras vibrando no modo de flexão, pois permitem bom casamento de

impedância com o ar e fornecem boa amplitude de vibração (Mulet *et. al*, 2003). As ranhuras têm a função de ajustar a geometria do transdutor de modo que as ondas formadas estejam todas em concordância de fase.

Em Juarez *et. al*, 1973 é descrito um projeto de transdutores para emissão em ar de baixa potência utilizando uma abordagem numérica para o cálculo da posição das ranhuras. Através de equações aproximadas da vibração de uma placa plana e de condições de contorno adequadas, obteve-se a localização das ranhuras. No trabalho realizado em 2010, Juarez utilizou a mesma abordagem para o desenvolvimento de transdutores de potência além da simulação utilizando o método dos elementos finitos.

Com a finalidade de maximizar os deslocamentos na superfície do transdutor sem sofrer influências de aproximações dos modelos numéricos foi proposto, para este trabalho de formatura, realizar uma otimização paramétrica da geometria do transdutor.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

A motivação deste trabalho foi o aperfeiçoamento da tecnologia de desenvolvimento de transdutores de ultrassom para emissão em gases. Há um elevado potencial de aplicações na indústria, devido à falta de transdutores eficientes para emissão em ar. Os gases têm baixa impedância acústica e alta absorção, o que prejudica a utilização de transdutores de ultrassom nesses meios (Juarez *et. al.*, 2002).

Teve-se como objetivo a modelagem, a fabricação e a caracterização de um transdutor piezelétrico de ultrassom para emissão em gases. O transdutor é constituído de uma cerâmica piezelétrica colada a um disco, que tem a função de maximizar a energia transmitida ao meio das ondas ultrassônicas. A cerâmica deverá ser escolhida convenientemente para operar na mesma frequência do modo de vibrar do disco. O disco, ou placa radiante, terá diâmetro da ordem de algumas dezenas de milímetros e conterá ranhuras na superfície radiante. O trabalho visa otimizar a geometria do disco, de forma que os deslocamentos por ele proporcionados sejam máximos, para uma determinada frequência de vibração, que deve ser superior a 150 kHz. O intuito é maximizar a energia transmitida para o meio, que está diretamente ligada à amplitude dos deslocamentos da superfície de radiação do transdutor. O transdutor é de baixa potência e deverá operar com uma salva senoidal ou em excitação contínua. Foram realizadas a caracterização da cerâmica e as simulações de comportamento do referido disco utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), além da fabricação e caracterização de protótipos.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A seguir, são descritos os principais conceitos utilizados na realização deste trabalho de formatura.

3.1 Placas Radiantes Vibrando no Modo de Flexão

Variando-se os parâmetros das placas vibrantes, pode-se melhorar seu desempenho num transdutor. Como cita Moon *et. al* (2009) aumentando-se a área da superfície radiante de um transdutor e mantendo-se uma frequência fixa, eleva-se também sua diretividade; porém, neste caso, deve-se ter uma restrição de projeto para o tamanho do transdutor. De acordo com Juarez *et. al*, 1994, aumentando-se o diâmetro de uma placa vibrante circular sem aumentar sua espessura, deve-se considerar modos de vibração mais elevados, o que aumenta o número de círculos nodais (regiões de deslocamento nulo).

Nos trabalhos de Moon *et. al* (2009) e Juarez (1994) verifica-se que para se obter maior deslocamento longitudinal num transdutor com placas radiantes, deve-se utilizar placas com ranhuras. Nas placas sem ranhuras, como pode-se ver na Fig. 1, há regiões em deslocamentos com oposição de fase, o que faz com que as ondas ultrassônicas sofram interferências destrutivas na propagação. Adicionando-se ranhuras de altura correspondente a meio comprimento de onda no ar, como visto na Fig. 2, produz-se uma maior região vibrando em concordância de fase, o que gera maior eficiência, pressão da onda acústica e diretividade. As ranhuras permitem que o campo acústico calculado seja equivalente ao de um pistão teórico de mesmo raio (Buiochi, 2008). Khmelev (2009) mostra que a utilização das ranhuras no transdutor também evita a presença de modos parasitas de vibração, ou seja, modos indesejados como modos de espessura ou radiais acoplados ao modo de flexão.

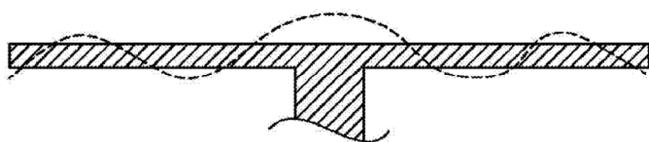


Figura 1: Placa sem ranhuras vibrando no modo de flexão (Moon, 2009).

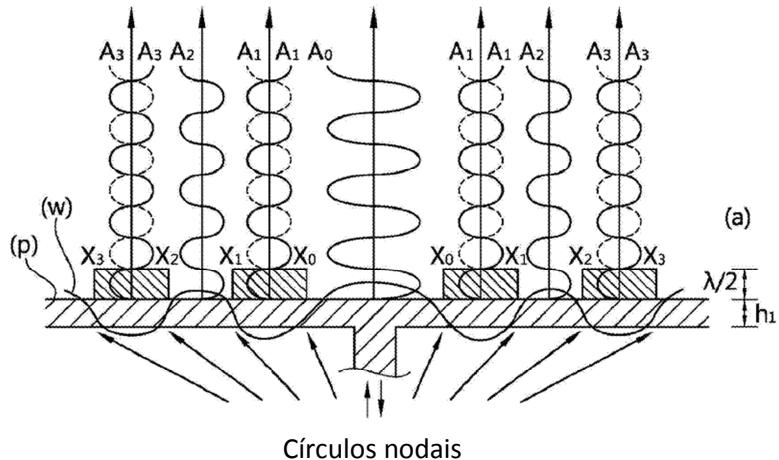


Figura 2: Placa com ranhuras para compensar a diferença de fase (Moon, 2009).

Os trabalhos de Buiochi (2008) e Juarez (1994) utilizam placas com ranhuras em ambas as faces da placa, como mostrado na Fig. 3 e não somente na superfície emissora. No trabalho de Juarez, a configuração com ranhuras em ambas as faces mostrou-se a melhor em termos de uniformidade de deslocamentos, em comparação com transdutores com placas planas e placas com ranhuras somente na face radiante.



Figura 3: Transdutor com ranhuras em ambas as faces (Buiochi, 2008).

Juarez (2010) trabalhando com transdutores de alta potência, utiliza placas retangulares com ranhuras (Fig. 4) sendo que a vantagem é maior capacidade de potência do transdutor. Porém, como no trabalho de Buiochi (2008) e nos trabalhos prévios de Juarez, foi escolhido trabalhar com superfície radiante circular, pois se pode excitar modos de vibração com círculos nodais concêntricos.

Verifica-se que os materiais comumente usados para a pesquisa com este tipo de transdutor são o alumínio e o titânio, provendo uma opção de escolha de materiais para transdutores para emissão em gases. Além disso, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é utilizado para a simulação do problema (Juarez, 2010) e a validade da modelagem é feita comparando-se os resultados simulados com os resultados experimentais.

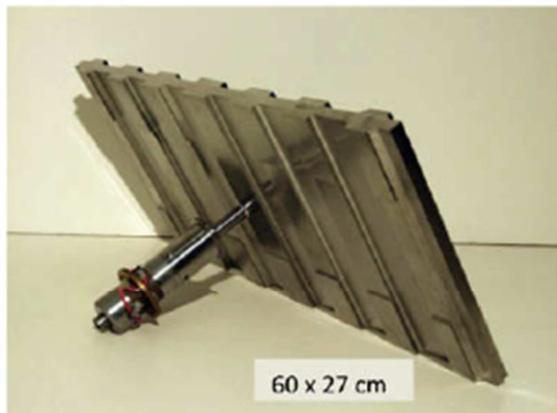


Figura 4: Transdutor com placa emissora retangular e ranhuras em ambas as faces (Juarez, 2010).

Para modelagem e estudo de um transdutor para emissão em ar de baixa potência, foi escolhido trabalhar com um modelo semelhante ao utilizado por Buiochi (2008) que consiste de uma cerâmica piezelétrica vibrando no primeiro modo lateral, sem um amplificador mecânico e colada diretamente ao disco circular com ranhuras. O trabalho realizado por Buiochi (2008) consiste de um transdutor de frequência de vibração de 170 kHz e com 5 círculos nodais. Neste trabalho o transdutor foi projetado para trabalhar a 200 kHz com 6 círculos nodais, além de ser realizada a otimização paramétrica.

O disco circular tem diâmetro de algumas dezenas de milímetros e será projetado para vibrar no modo de flexão a frequências superiores a 150 kHz. Esses parâmetros do disco serão diferentes dos transdutores usados por Juarez (2010) que tem dimensões de dezenas de centímetros e operam a baixas frequências de ultrassom (próximas de 25 kHz) e alta potência (acima de 2,5 kW). Será realizada uma otimização do mesmo, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) e ao final o transdutor construído será comparado com o modelo experimental.

3.2 Acústica

3.2.1 Definições

Existem dois tipos de onda que se propagam num meio elástico e infinito (meio em que a onda se propaga continuamente, sem refletir ou refratar): ondas longitudinais e ondas de cisalhamento. Nas ondas longitudinais, as partículas se deslocam na direção de propagação da onda, enquanto nas ondas de cisalhamento, a vibração ocorre perpendicularmente a essa direção.



Figura 5: Onda longitudinal com comprimento de onda representado entre duas zonas de compressão (Portal GEF-UFSM).

Considerando que a propagação da onda acústica é um processo praticamente adiabático e que os deslocamentos das partículas são pequenos, de forma não haja variação de densidade do meio, adota-se o modelo linear de propagação, da qual são extraídas as definições abaixo (Kinsler, 1982).

Relação entre frequência f e comprimento de onda λ_0 que define a velocidade da onda:

$$c = \lambda_o f \quad (3.1)$$

Relação entre período e frequência:

$$T_o = \frac{1}{f} \quad (3.2)$$

Fluidos pouco viscosos oferecem pouca restrição a deformação se comparados aos sólidos. As forças restauradoras responsáveis pela propagação de uma onda são as mudanças de pressão que ocorrem quando o fluido é comprimido ou expandido. Uma partícula do fluido se move para frente e para trás na direção da força, produzindo regiões adjacentes de compressão e rarefação (Kinsler, 1982). Nesses fluídos tem-se somente a propagação de ondas longitudinais.

Para representar o movimento da partícula, considere um sistema orientado nas direções x, y e z, pelos vetores unitários \hat{e}_1 , \hat{e}_2 e \hat{e}_3 , assim:

Vetor posição da partícula:

$$\vec{r} = x\hat{e}_1 + y\hat{e}_2 + z\hat{e}_3 \quad (3.3)$$

Vetor deslocamento da partícula:

$$\vec{u} = \vec{r}(x, y, z, t) - \vec{r}(x, y, z, 0) \quad (3.4)$$

Velocidade da partícula:

$$\vec{v} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \quad (3.5)$$

3.2.2 Equações da Elasticidade

As equações constitutivas da elasticidade relacionam a tensão mecânica (\mathbf{T}) com a deformação mecânica (\mathbf{S}) e serão fundamentais para o desenvolvimento da equação de onda. As definições são realizadas para materiais isotrópicos não piezelétricos.

Considerando um cubo de volume infinitesimal, em cada face do cubo estarão presentes três componentes de tensão, representadas por notação indicial T_{ij} , em que ij indica que a direção da componente de tensão é na mesma direção do versor \hat{e}_i e a tensão é aplicada

sobre a face normal ao versor \hat{e}_j (como definido na eq. (3.3)). Como a rotação do volume infinitesimal não desempenha nenhum papel na vibração, a soma dos momentos nesse elemento deve ser nula, então o tensor deve ser simétrico:

$$\mathbf{T}_{ij} = \mathbf{T}_{ji} \quad ij = 1, 2, 3 \quad (3.6)$$

A deformação S_{ij} pode ser escrita em função dos deslocamentos, pela seguinte relação deformação – deslocamento linearizada (Auld, 1973) :

$$\mathbf{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad ij = 1, 2, 3 \quad (3.7)$$

A partir da Segunda Lei de Newton obtém-se as Equações Fundamentais:

$$\frac{\partial \mathbf{T}_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad ij = 1, 2, 3 \quad (3.8)$$

em que b_i representa as forças de campo e ρ a densidade do meio.

Um corpo rígido tem sua forma alterada quando uma força externa é aplicada. Um material elástico é conhecido por retornar ao seu estado original assim que a força externa é removida. Portanto, assumindo um modelo linear de propagação de onda e processo adiabático, considerando a elasticidade de um corpo rígido, obtém-se as Equações Constitutivas (Auld, 1973):

$$\mathbf{T}_{ij} = c_{ijkl} \mathbf{S}_{kl} \quad ijk = 1, 2, 3 \quad (3.9)$$

em que os coeficientes c_{ijkl} são chamados de coeficientes de rigidez.

Como todos os componentes da eq. (3.9) são simétricos ela será reescrita na forma matricial reduzida em que os tensores de tensão (\mathbf{T}) e deformação (\mathbf{S}) podem ser escritos com apenas seis componentes (Auld, 1973).

Os componentes longitudinais correspondem aos índices:

$$xx = 1 \quad yy = 2 \quad zz = 3 \quad (3.10)$$

E os componentes de cisalhamento aos índices:

$$yz = 4 \quad xz = 5 \quad xy = 6 \quad (3.11)$$

Assim, a Eq. Constitutiva (eq. 3.9) pode ser reescrita na forma reduzida como:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Para os materiais isotrópicos, que são elasticamente equivalentes em todas as direções, o numero de constantes elásticas independentes se reduz a duas, que são as constantes de Lamé λ e μ :

$$c_{12} = \lambda \quad c_{44} = \mu \quad c_{11} = \lambda + 2\mu \quad (3.13)$$

Considerando-se uma onda unidimensional se propagando na direção z, e substituindo na Equação Fundamental (3.8) e na Equação Constitutiva (3.9), obtém-se a equação de onda longitudinal (3.14):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.14)$$

em que:

$$c = \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}} \quad (3.15)$$

é a velocidade de propagação da onda longitudinal.

3.2.3 Velocidade de Propagação na Cerâmica Piezelétrica

Como especificado no trabalho a cerâmica deve vibrar no primeiro modo lateral, como mostra a Fig. 6. Nela pode-se observar que o diâmetro da cerâmica corresponde a meio comprimento de onda que se propaga no próprio material piezelétrico.

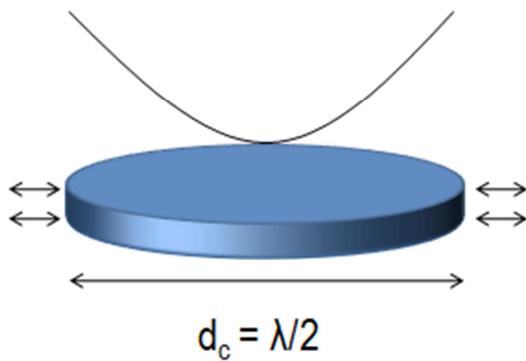


Figura 6: Cerâmica piezelétrica vibrando no primeiro modo radial. O arco indica a amplitude dos deslocamentos.

Se no primeiro modo o material vibra com uma frequência f_1 a velocidade de propagação na cerâmica (c_c), de acordo com a equação 1, será:

$$c_c = 2d_c f_1 \quad (3.16)$$

3.2.4 Impedância Acústica

A impedância acústica pode ser definida como uma relação entre a tensão mecânica (T) e a velocidade da partícula (v) ou como o produto entre densidade do meio (ρ) e velocidade de propagação (c). É um fator muito importante no desenvolvimento de transdutores, pois permite determinar a eficácia da transferência de energia na interface entre dois meios de um sistema ultrassônico (Esminger, 2009).

$$Z = \frac{T}{v} = \rho c \quad [Z] = \frac{Pa.s}{m} \quad (3.17)$$

3.2.5 Campo Acústico

O campo acústico de um transdutor é a característica que limita o desempenho de um sistema (Silva, 1993), visto que ele mostra como é a distribuição da amplitude de pressão no

meio. A determinação será feita considerando um transdutor ideal, ou seja, um pistão plano (amplitudes e fases de vibração constantes em toda a superfície do transdutor).

Considere um pistão plano circular de raio a e área S submetido a uma excitação contínua (frequência única), como descrito na Fig. 7.

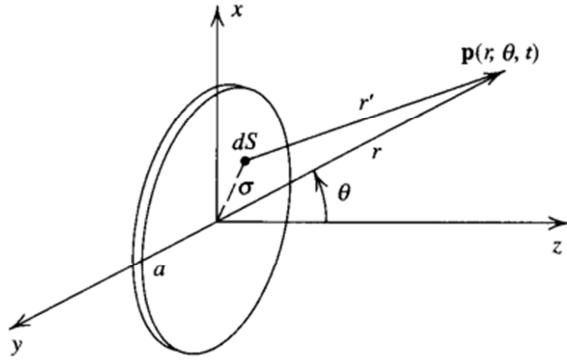


Figura 7: Modelo de pistão plano (Kinsler, 1982).

O potencial de velocidade é obtido através da solução da integral de Rayleigh:

$$\varphi(\vec{r}, t) = \iint_S \frac{V_0 e^{-j\omega(t - \frac{r'}{c})}}{2\pi r'} dS \quad (3.18)$$

Em que V_0 é a amplitude da velocidade normal à face do pistão, ω é a frequência angular de excitação, c a velocidade de propagação da onda, a é o raio do pistão e $j = \sqrt{-1}$ é o número imaginário. As componentes r e r' , como mostra a Fig. 7 são a distância entre o centro do pistão e o ponto analisado e a distância entre o elemento de área da face do pistão e o ponto, respectivamente. Esta é uma integral de superfície para superfícies planas, em que o potencial de velocidade num dado ponto do campo é devido à contribuição de uma série de fontes pontuais na superfície do transdutor (Princípio de Huygens) (Kinsler, 1982).

A pressão então será dada por:

$$p(\vec{r}, t) = p(r, \theta, t) = -\rho \frac{\partial \varphi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -j\omega \rho \varphi(\vec{r}, t) \quad (3.19)$$

Apesar da integral de Rayleigh ser complicada, a solução para a pressão acústica sobre o eixo z ($\theta = 0$) fica:

$$p(r, 0, t) = \rho c V_0 \left\{ 1 - e^{-jk[\sqrt{r^2+a^2}-r]} \right\} e^{j\omega(t-\frac{r}{c})} \quad (3.20)$$

Em que o número de onda é dado por:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.21)$$

A pressão sobre o eixo z produzida por um pistão plano tem característica oscilatória com número de máximos e mínimos aumentando com a razão $\frac{a}{\lambda}$ no campo próximo. O campo distante começa a partir do último ponto de máximo da pressão e, partir dessa posição, decresce monotonicamente se aproximando de uma assíntota dependente de $\frac{1}{r}$, como mostra a Fig. 8.

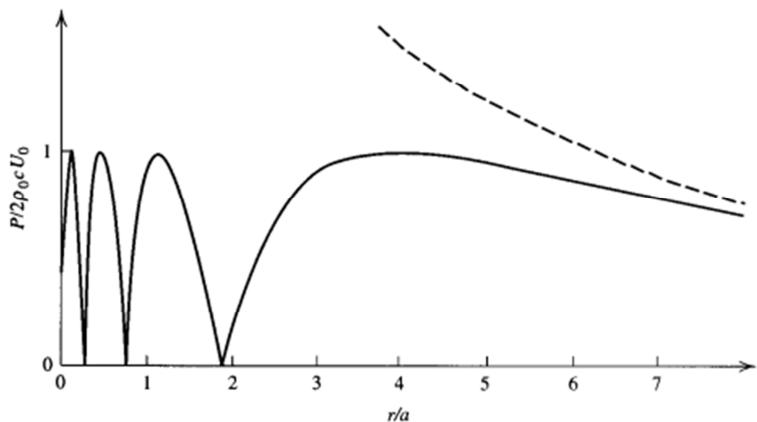


Figura 8: Amplitude de pressão axial para um pistão plano circular com $ka = 8\pi$. A linha sólida provém de cálculo exato da teoria e a linha tracejada é a assíntota ($p = (ap_m c V_0 ka)/(2r)$) no campo distante (Kinsler, 1982).

3.3 Piezelectricidade

Piezelectricidade é um fenômeno que foi descoberto pelos irmãos Pierre e Jacques Curie, em 1880. O nome vem do grego e significa “eletricidade por pressão” (*piezo* significa pressão) e quem o propôs foi Hankel, um ano após a descoberta do efeito.

A Fig. 9 ilustra o que ocorre num material piezelétrico quando submetido a uma força externa. A Fig. 9a mostra uma molécula eletricamente neutra. Ao se aplicar uma força externa ou pressão, a estrutura reticular interna da molécula se deforma, gerando dipolos pela separação das cargas elétricas (Fig. 9b). A Fig. 9c ilustra o efeito de polarização na superfície.

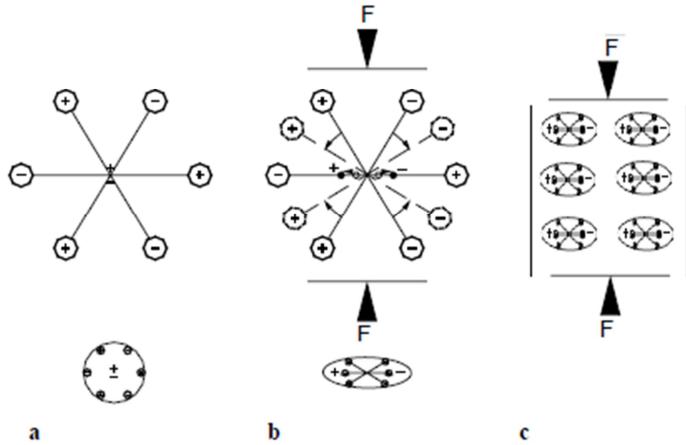


Figura 9: Explicação simplificada do efeito piezelétrico: (a) molécula neutra; (b) dipolo formado pela aplicação de força externa; (c) polarização na superfície do material piezelétrico (Arnau, 2008).

Um ano após a descoberta do efeito piezelétrico, os irmãos Curie verificaram, também, a existência do processo inverso do efeito. Ou seja, uma deformação mecânica pode ser gerada num material piezelétrico a partir da aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre os eletrodos do material.

As cerâmicas piezelétricas tem um comportamento complexo e não linear, porém para aplicações de baixa potência pode-se utilizar a aproximação linear, como apresentada pelas equações (3.22) e (3.23). A não linearidade deve ser levada em conta em aplicações de alta potência, em que o material piezelétrico depende da temperatura de operação e das solicitações mecânicas e elétricas (IEEE, 1987).

Devido às características do efeito piezelétrico, sua formulação matemática leva em consideração termos mecânicos e elétricos. Assim as equações constitutivas da piezeletricidade são definidas por:

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e} \mathbf{E} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}^T \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{E} \quad (3.23)$$

Em que:

\mathbf{T} = tensor de tensões (N/m^2);

\mathbf{D} = vetor de deslocamento elétrico (C/m^2);

\mathbf{S} = tensor de deformações;

\mathbf{E} = vetor campo elétrico (V/m);

\mathbf{e} = tensor de coeficientes piezelétricos (C/m^2);

\mathbf{c}^E = tensor de rigidez medido a campo elétrico constante (N/m^2);

$\mathbf{\epsilon}^S$ = tensor de permissividade elétrica medida a deformação constante (C^2/Nm^2);

Definindo-se os componentes das equações constitutivas na forma de matrizes em função da direção nos eixos x, y e z e utilizando a notação reduzida, tem-se:

$$T = \begin{pmatrix} T_{xx} \\ T_{yy} \\ T_{zz} \\ T_{yz} \\ T_{xz} \\ T_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix}; \quad S = \begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{yy} \\ S_{zz} \\ S_{yz} \\ S_{xz} \\ S_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix}; \quad (3.24)$$

$$D = \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix}; \quad E = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}; \quad (3.25)$$

Considerando um cristal piezelétrico de classe de simetria 6mm, com comportamento eletromecânico simétrico no plano xy e direção de polarização no eixo z:

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & \mathbf{C}_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{C}_{12} & \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{C}_{13} & \mathbf{C}_{13} & \mathbf{C}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{C}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{C}_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (\mathbf{C}_{11} - \mathbf{C}_{12})/2 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\mathbf{\epsilon}^S = \begin{bmatrix} \mathbf{\epsilon}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{\epsilon}_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{\epsilon}_{33} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

3.4 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O MEF é um procedimento numérico que permite obter a solução de vários problemas da física e engenharia. Áreas típicas da engenharia que contêm problemas resolvidos pelo MEF são análise estrutural, transferência de calor, escoamento de fluidos, transferência de massa e eletromagnetismo.

Para problemas envolvendo geometrias complexas, carregamentos variáveis e propriedades de materiais dependentes da posição, em geral, não é possível obter soluções analíticas devido à dificuldade de se resolver as equações diferenciais parciais envolvidas. Para esses problemas utiliza-se o MEF, que é um método que depende da divisão da estrutura em áreas discretas chamadas de elementos finitos, como pode ser visto na Fig. 10.

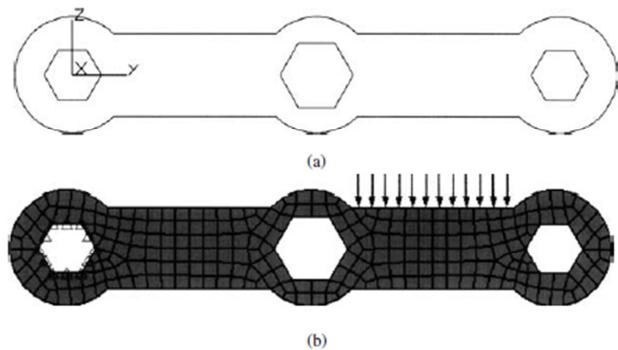


Figura 10: (a) Estrutura a ser resolvida pelo MEF; (b) estrutura discretizada, com restrições e carregamentos (Logan, 2007).

Os elementos finitos são compostos por linhas, áreas e nós, que conectam elementos vizinhos. Nesse método, ao invés de se resolver o problema através de um único equacionamento para toda a estrutura, são montadas equações para cada elemento da discretização. As soluções são então combinadas para gerarem a solução para toda a estrutura.

Como no MEF o domínio do problema é discretizado, a solução de problemas com domínios irregulares se torna mais simples que em outros métodos numéricos. Outras duas vantagens do método são a diminuição do tempo de análise do modelo e a redução do número de protótipos construídos e de ensaios realizados (Logan, 2007).

3.4.1 MEF Estrutural

Considere uma estrutura de material uniforme e densidade ρ submetida a esforços e restrições, à qual se deseja modelar pelo MEF. Ao se fazer o balanço de forças para cada elemento da estrutura discretizada e montar o sistema de equações, obtém-se a seguinte equação matricial para o caso mais genérico (Zienkiewicz e Cheung, 1967):

$$[\mathbf{M}_{UU}]\{\ddot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{C}_{UU}]\{\dot{\mathbf{U}}\} + [\mathbf{K}_{UU}]\{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (3.29)$$

Em que \mathbf{U} é o vetor de deslocamentos de cada nó e \mathbf{F} representa as forças mecânicas (distribuídas ou pontuais).

Os deslocamentos \mathbf{U} em cada nó podem ser usados para aproximar os deslocamentos em outras posições do elemento através da equação:

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}_U^T \mathbf{U} \quad (3.30)$$

Em que \mathbf{N}_U é o vetor função de forma ou função interpoladora do deslocamento. Assim, a matriz de massa é definida por:

$$\mathbf{M}_{UU} = \iiint_V \rho [\mathbf{N}_U]^T [\mathbf{N}_U] dV \quad (3.31)$$

A deformação relaciona-se com os deslocamentos da seguinte forma:

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}_i \mathbf{u} = \mathbf{B}_i [\mathbf{N}_U] \mathbf{U} = \mathbf{B}_U \mathbf{U} \quad (3.32)$$

A matriz \mathbf{B}_i é a matriz deformação-deslocamento e, no caso tridimensional, é descrita pelo diferencial:

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

A matriz de rigidez é definida como:

$$\mathbf{K}_{UU} = \iiint_V [\mathbf{B}_U]^T [\mathbf{c}^E] [\mathbf{B}_U] dV \quad (3.34)$$

Assim, como foi definido no item 3.3, \mathbf{c}^E é a matriz de rigidez.

\mathbf{C}_{UU} é a matriz de amortecimento e pode ser obtida através das propriedades da estrutura. Por ser uma matriz cheia, tem-se um grande esforço computacional para resolver o sistema de equações. No entanto, é comum aproximar o amortecimento pela relação de Rayleigh, relacionando \mathbf{C}_{UU} com \mathbf{K}_{UU} e \mathbf{M}_{UU} através de constantes de amortecimento α e β (Cai, 2002):

$$\mathbf{C}_{UU} = \alpha \mathbf{M}_{UU} + \beta \mathbf{K}_{UU} \quad (3.35)$$

3.4.2 MEF Piezelétrico

As equações constitutivas que representam o fenômeno piezelétrico foram apresentadas no item 3.3, nas eq. (3.22) e eq. (3.23). Para a formulação do MEF piezelétrico, deve-se levar em consideração equações de movimento e equações elétricas para o material (Naillon, 1973).

Pela Segunda Lei de Newton, obtém-se a seguinte equação do movimento:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \mathbf{T} \quad (3.36)$$

Em que o operador $\nabla \cdot$ é dado por:

$$\nabla \cdot = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

A equação de Maxwell fornece a equação de comportamento elétrico:

$$\operatorname{div}(\mathbf{D}) = 0 \quad (3.38)$$

Além disso, tem-se que:

$$\mathbf{E} = -\operatorname{div}(\Phi) \quad (3.39)$$

Em que $\operatorname{div}()$ é o operador divergente e Φ é o potencial elétrico.

Utilizando-se as equações constitutivas de movimento e elétricas para um material piezelétrico e considerando as mesmas notações do item 3.4.1, obtém-se a formulação matricial do modelo piezelétrico sem considerar o amortecimento dielétrico (Ostergaard e Pawlak, 1986):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{UU} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{UU} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{UU} & \mathbf{K}_{U\Phi} \\ \mathbf{K}_{U\Phi}^T & \mathbf{K}_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{Bmatrix} \quad (3.40)$$

Em que \mathbf{Q} são as cargas elétricas (distribuídas e pontuais) e as matrizes de acoplamento piezelétrico ($\mathbf{K}_{U\Phi}$) e de rigidez dielétrica ($\mathbf{K}_{\Phi\Phi}$) são definidas por:

$$\mathbf{K}_{U\Phi} = \iiint_V [\mathbf{B}_U]^T [\mathbf{e}]^T [\mathbf{B}_\Phi] dV \quad (3.41)$$

$$\mathbf{K}_{\Phi\Phi} = \iiint_V [\mathbf{B}_\Phi]^T [\boldsymbol{\varepsilon}^S] [\mathbf{B}_\Phi] dV \quad (3.42)$$

E \mathbf{B}_Φ provém da eq. (3.39) considerando a aproximação do potencial elétrico, que é semelhante ao caso dos deslocamentos na eq. (3.3):

$$\phi = \mathbf{N}_\Phi^T \Phi \quad (3.43)$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{div}([\mathbf{N}_\Phi]\Phi) = -\mathbf{B}_\Phi \Phi \quad (3.44)$$

O vetor \mathbf{N}_Φ , assim como \mathbf{N}_U , também é um vetor função de forma só que, nesse caso, para o potencial elétrico.

3.4.3 Análise Modal

A análise modal é utilizada no cálculo das frequências de ressonância e antirressonância e dos modos de vibrar do transdutor. Para se obter as frequências de ressonância, deve-se modelar o transdutor com curto-círcuito entre os eletrodos. As frequências de antirressonância são obtidas abrindo o circuito entre os eletrodos, ou seja, aterrando um deles e retirando a tensão elétrica do outro.

3.4.4 Análise Harmônica

A resposta de um transdutor piezelétrico submetido a tensões elétricas senoidais é obtida através da análise harmônica ou dinâmica da estrutura.

Considere a tensão elétrica e a carga elétrica dadas por:

$$\Phi(t) = \Phi_0 e^{-j(\omega t + \theta_1)} \quad (3.45)$$

$$Q(t) = Q_0 e^{-j(\omega t + \theta_2)} \quad (3.46)$$

Na qual Φ_0 e Q_0 são as amplitudes, ω a frequência e θ_1 e θ_2 as fases.

As forças, cargas elétricas, deslocamentos e tensão elétrica podem estar defasados um em relação ao outro, no entanto, devem ter a mesma frequência.

Relaciona-se a carga elétrica com a corrente elétrica da forma:

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (3.47)$$

A análise harmônica fornece a resposta em frequência do transdutor, podendo ela ser a carga elétrica ou deslocamentos.

A impedância elétrica (Z) e admitância elétrica (Y) são calculadas a partir da carga elétrica Q_0 por:

$$Z = \frac{\Phi}{I} = \frac{\Phi_0}{j\omega Q_0} = R + jX \quad (3.48)$$

$$Y = \frac{1}{Z} = G + jB \quad (3.49)$$

Em que \mathbf{R} é a resistência elétrica, \mathbf{X} a reatância, \mathbf{G} a condutância e \mathbf{B} é a susceptância.

As frequências de ressonância podem ser encontradas pelos máximos de $|Y|$ e \mathbf{G} ou pelos mínimos de $|\mathbf{Z}|$ e \mathbf{R} . As frequências de antirressonância são obtidas pelos máximos de $|\mathbf{Z}|$ e \mathbf{R} ou pelos mínimos de $|Y|$ e \mathbf{G} . A Fig. 11 ilustra as frequências de ressonância e antirressonância para o caso da impedância elétrica:

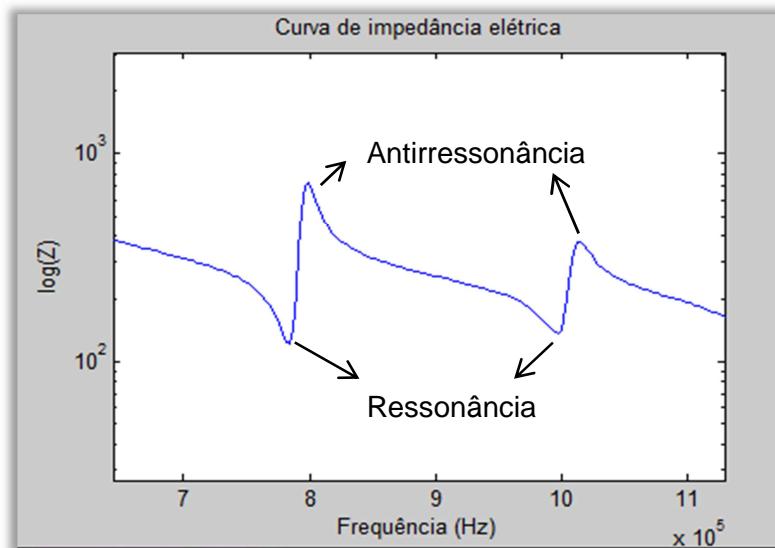


Figura 11: Resposta em frequência da impedância elétrica (Z), com indicação das frequências de ressonância e antirressonância.

3.5 Otimização

A otimização de um projeto é a busca pelo melhor resultado de uma certa operação que satisfaça certas restrições. A motivação é explorar a combinação dos recursos disponíveis de modo que os benefícios sejam maximizados (Haftka e Gürdel, 1992).

O desenvolvimento de técnicas de otimização remontam ao século dezoito e o processo é utilizado em diversas áreas como otimização aplicada a mecânica estrutural, buscando diminuir a massa da estrutura e mantendo a mesma rigidez (Haftka e Gürdel, 1992), economia e finanças, visando maximizar lucros (Stern *et. al*, 2006), química, procurando obter a configuração macromolecular de menor energia potencial (Wales; Doye, 1997), entre outras.

3.5.1 Conceitos Básicos de Otimização

Nos problemas estruturais são utilizados três tipos principais de otimização: a paramétrica, de forma e topológica.

A otimização paramétrica consiste em alterar as dimensões da estrutura sem mudar sua forma que foi pré-definida. Enquanto na otimização de forma, os contornos são parametrizados por curvas *splines* e variados e na otimização topológica trabalha-se com a variação da distribuição de material no interior da estrutura.

Para se resolver problemas de otimização, deve-se conhecer três conceitos básicos (Haftka, Gürdel, 1992):

- Váriáveis de projeto:

Parâmetros a serem variados na otimização. Existe um intervalo de variação dentro do qual essas variáveis independentes podem assumir qualquer valor.

- Variáveis de estado ou restrições:

São relações que introduzem limites para os valores das variáveis de projeto.

Considerando-se um conjunto de variáveis de projeto $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, são classificados três tipos de restrições (Silva, 2006):

$$x_{min_i} \leq x_i \leq x_{max_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.50)$$

que representa a restrição lateral. Uma restrição de inigualdade é do tipo:

$$g_j(x) \geq 0; \quad j = 1, 2, \dots, n_g \quad (3.51)$$

Enquanto uma restrição de igualdade é representada por:

$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, n_e \quad (3.52)$$

Em geral, evita-se um grande número de restrições para que o custo computacional não seja muito alto.

As restrições são classificadas em ativas (se $g_j(x) = 0$) ou inativas (se $g_j(x) \geq 0$).

Uma restrição ativa significa que o valor das variáveis de projetos x_1, x_2, \dots, x_j foram limitadas por essa restrição. Portanto, ao final da otimização espera-se que todas as restrições estejam ativas, caso contrário, as restrições inativas não influenciariam no problema e poderiam ser ignoradas desde o início.

- Função objetivo:

É a função (f) que relaciona as variáveis de projeto e deve ser minimizada (ou maximizada). Em otimização estrutural, massa, deslocamentos, tensões, frequências de ressonância e custo são alguns exemplos de funções objetivo comumente utilizadas (Haftka; Gürdal, 1992).

Há algumas equivalências na função objetivo que podem simplificar a resolução do problema, por exemplo, minimizar f é equivalente a minimizar kf (em que k é uma constante) ou maximizar $-f$ ou $1/f$.

Utilizando as definições dadas acima, a formulação padrão de um problema de otimização fica:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } f(x) \\ &\text{Tal que } g_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n_g \\ &\quad h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, n_h \end{aligned} \tag{3.53}$$

3.5.2 Algoritmos de Otimização

Neste trabalho será utilizado um algoritmo de otimização sem restrição, para o cálculo das propriedades da cerâmica piezelétrica, e um algoritmo de otimização com restrição, para a obtenção das dimensões do transdutor. Ambos os algoritmos resolvem problemas não lineares e, no software Matlab, são representados pelas funções descritas a seguir:

- $fminsearch()$:

Resolve problemas de otimização utilizando o algoritmo Nelder-Mead. Recebe como entrada a função objetivo do problema e uma estimativa inicial da solução, visto que a função encontra somente os mínimos locais. Também é possível entrar com um valor de tolerância para o valor da função objetivo ou dos pontos do domínio como critério de parada.

A cada iteração, verifica o valor da função objetivo para $n+1$ pontos de uma função n -dimensional. O pior ponto (ponto cuja função objetivo forneceu maior valor) é descartado e um novo ponto é estimado. No pior caso todos os n piores pontos são descartados e n novos pontos são estimados. As iterações terminam quando um critério de parada é obedecido.

- $ga()$:

Algoritmo genético (AG) – é um algoritmo que resolve problemas de otimização paramétrica simulando os mecanismos da genética natural. Assim como as técnicas de *simulated annealing* e *particle swarm*, o algoritmo genético utiliza regras com combinação de heurística e aleatoriedade para guiar a busca pelo máximo ou mínimo global.

A premissa é de que se for possível criar um algoritmo que imite a seleção natural, então a otimização poderá ser realizada com maior sucesso. Considera-se que um indivíduo seja um vetor com valores para cada uma das variáveis de projeto e que somente sobrevive numa grande população se for o mais apto, ou seja, se tiver o melhor valor da função objetivo (Haftka e Gürdal, 1992).

Em geral, o algoritmo gera uma população inicial de indivíduos aleatórios e as próximas gerações são formadas a partir dos melhores indivíduos das gerações anteriores, a partir de cruzamentos entre indivíduos das gerações anteriores e a partir de mutações de alguns indivíduos.

Um indivíduo proveniente de cruzamento contém informações (variáveis de projeto) provenientes da combinação de características (variáveis de projeto) de dois indivíduos da geração anterior. Um indivíduo é proveniente de mutação quando alguma informação de seus genes é modificada. O fluxograma da Fig. 12 indica as funções básicas de um AG.

Algumas variações do AG trabalham com populações de indivíduos em paralelo, de modo que cada população é um subgrupo isolado, em que podem ocorrer migrações de indivíduos entre populações. Esta é uma diferença do algoritmo genético para outros algoritmos também estocásticos, pois eles trabalham com pontos únicos no espaço de procura (domínio do

problema), enquanto o AG mantém uma população de potenciais soluções (Renner e Ekárt, 2003).

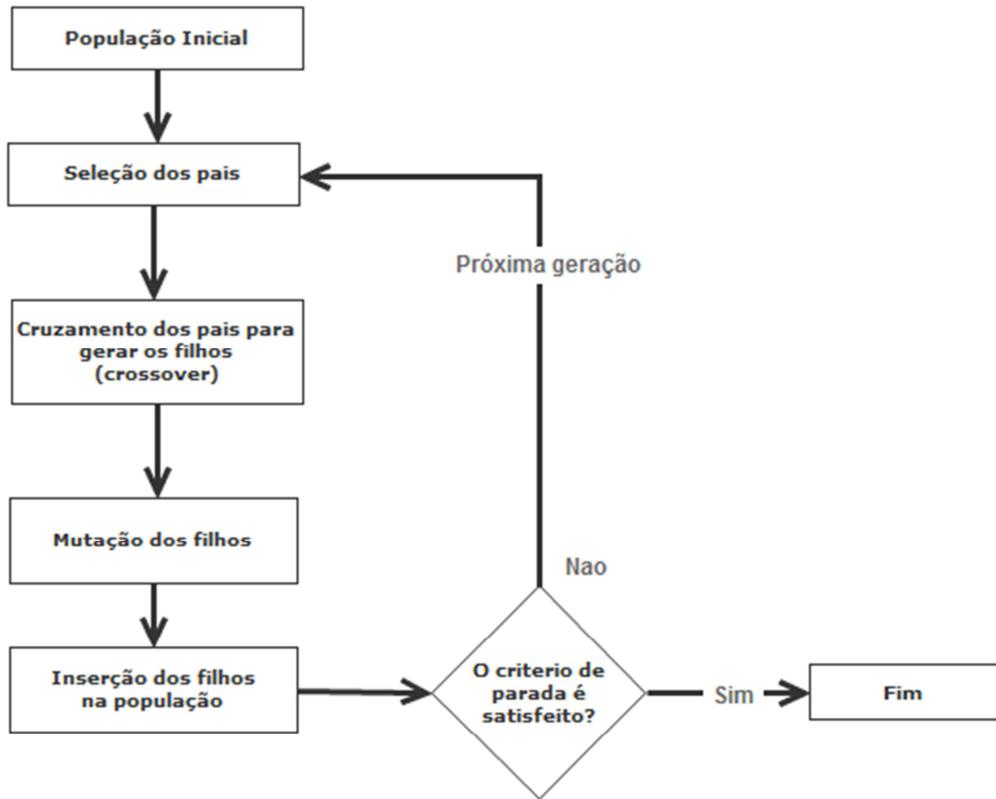


Figura 12: Fluxograma de funcionamento do algoritmo genetico.

O AG possui a vantagem de não utilizar o gradiente da função objetivo, como muitos algoritmos de otimização não estocásticos. O problema básico de métodos que utilizam o gradiente é que eles encontram somente o mínimo local de uma função que deve ser contínua e a solução depende do ponto inicial (Renne e Ekárt, 2003). Outro ponto interessante do AG é o fato de poder ser aplicado a problemas com caráter altamente não-linear (Renne e Ekárt, 2003) ou ainda, com domínios não-convexos ou disjuntos (Haftka e Gürdal, 1992).

Apesar do alto custo computacional que envolve o uso do AG com muitas variáveis de projeto juntamente com uma análise utilizando o MEF, este algoritmo foi escolhido para auxiliar o desenvolvimento do transdutor. A função objetivo do problema proposto, que se encontra no Item 6.3.1, tem a característica de não ser contínua, pelo fato de não ser garantido que o modo de vibração do transdutor analisado em cada indivíduo da população seja o modo desejado com 6 círculos nodais, como detalhado na descrição do programa criado, no item 6.3.3.

4 METODOLOGIA

Os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do transdutor piezelétrico de ultrassom para emissão em ar estão divididos entre três partes distintas: a modelagem computacional, a fabricação e a caracterização do transdutor.

Na etapa de modelagem, descrita no item 5, os softwares ANSYS e Matlab são largamente utilizados. O software ANSYS permite a simulação do comportamento vibracional do transdutor utilizando o método dos elementos finitos. O software Matlab é utilizado para a caracterização da cerâmica e para a otimização paramétrica da geometria do transdutor, além de auxiliar na caracterização dos protótipos construídos. O transdutor, constituído de uma cerâmica piezelétrica colada no disco emissor, foi simulado utilizando o modelo axissimétrico do ANSYS. Os resultados teóricos da otimização paramétrica realizada são apresentados no item 6.

Os parâmetros considerados para a fabricação são: frequência de atuação do transdutor acima de 150 kHz, presença de 6 círculos nodais no modo de vibrar do disco emissor, diâmetro aproximado de 60 mm e vibração da cerâmica piezelétrica no primeiro modo radial. Para a excitação da cerâmica é utilizado um gerador de funções e um amplificador, com o propósito de gerar o sinal desejado.

Para a caracterização de transdutores, utilizam-se um transdutor de referência para comparação do campo acústico, impedômetro fasorial para o cálculo da impedância elétrica, interferômetro a laser para medição de deslocamentos normais à superfície de radiação. Para excitação dos transdutores foi utilizado um gerador de sinais e um amplificador e para a visualização dos resultados foram utilizados um osciloscópio e um pulsador-receptor. A descrição detalhada das medições realizadas encontram-se no item 7.

5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

5.1 Modelagem utilizando o ANSYS

Este trabalho de modelagem consiste em simular o comportamento vibracional de um transdutor constituído de uma cerâmica piezelétrica e uma estrutura de um disco. A modelagem da cerâmica justifica-se pelo fato de ser necessário escolher suas dimensões e o material que forneçam a frequência de vibração desejada. A simulação do disco, por sua vez, é importante para que se verifique qual geometria fornece maiores deslocamentos do disco vibrando na frequência imposta pela cerâmica.

Sem a simulação computacional o trabalho seria muito longo e ineficaz, tendo que construir um protótipo para cada geometria de disco ou cerâmica desejada. Haveria, neste caso, muito desperdício de material e de tempo caso fosse necessário, por exemplo, analisar algumas dezenas de geometrias do disco. Outra solução sem utilizar modelagem seria somente realizar soluções analíticas para as estruturas. No entanto, as soluções para estruturas com materiais anisotrópicos e piezelétricos são demasiadamente complexas e difíceis de serem obtidas (Segerlind, 1984).

O software de simulação utilizado é o ANSYS, que é uma ferramenta que fornece soluções através da realização do MEF.

As etapas da simulação no ANSYS consistem em:

- **pré-processamento:** etapa em que se deve criar a geometria a ser analisada, definir os materiais e criar a malha de elementos finitos a ser utilizada nos cálculos;
- **solução:** nesta etapa são definidas as condições de contorno e realizada a solução propriamente dita;
- **pós-processamento:** etapa em que são analisados os resultados, que podem ser listas de valores, gráficos, figuras ou modelos animados.

5.2 Modelagem da cerâmica

O disco de cerâmica utilizado é de titanato zirconato de chumbo (PZT) com classe de simetria de 6mm. Foi previamente escolhido o material PZT5A por ser uma cerâmica mole que vibra em banda larga. Nas faces superior e inferior da cerâmica são depositados os eletrodos, que irão proporcionar o campo elétrico desejado. A Fig. 13 ilustra a geometria e os eletrodos na cerâmica.

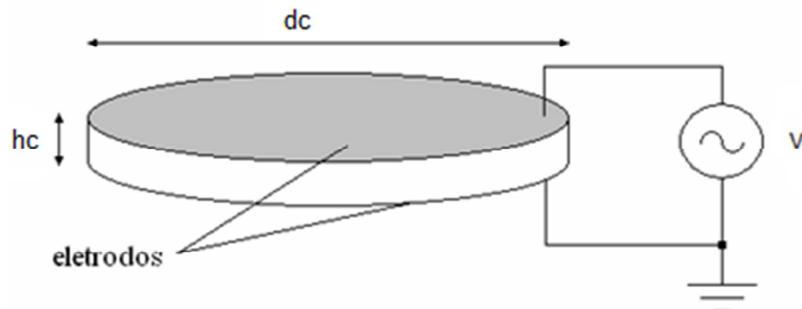


Figura 13: Geometria do disco de material piezelétrico.

Inicialmente são realizadas várias simulações, variando-se alguns parâmetros como espessura do disco da cerâmica, tamanho dos elementos na discretização e tensão elétrica aplicada. A finalidade das simulações é verificar a influência de cada parâmetro no comportamento vibracional da cerâmica, de modo que seja possível escolher uma geometria do material piezelétrico adequada aos requisitos do trabalho, que é ter um material que vibre a uma frequência acima de 150 kHz no modo radial.

Devido à geometria cilíndrica é utilizado o modelo axissimétrico para simulação. O elemento PLANE13 foi utilizado para modelar o material piezelétrico. Esse tipo de elemento, que é aplicado para gerar a malha da cerâmica, possui quatro nós com graus de liberdade em cada nó de deslocamentos em X e Y e potencial elétrico. Esse material piezelétrico é anisotrópico, não tendo as propriedades elásticas iguais em todas as direções.

A Fig. 14 mostra a aplicação de tensão elétrica na cerâmica piezelétrica (em verde) e em cada região de mesmo potencial elétrico os nós devem ser acoplados uns aos outros.

Para realização da análise harmônica, deve-se aplicar tensão entre os polos da cerâmica, como ilustrado na Fig. 13. Já para a análise modal do transdutor, as frequências de antirressonância são obtidas aterrando um eletrodo e abrindo o circuito no eletrodo oposto e as frequências de ressonância são obtidas curto-circuitando os eletrodos.

5.3 Modelagem do Disco Emissor

O material do disco é o alumínio, que foi definido através de testes comparando-o com o titânio e uma *syntactic foam*, como visto no item 5.5.1. Assim como a cerâmica, todo o transdutor é simulado usando o modelo axissimétrico. No entanto, como o alumínio é um elemento estrutural não piezelétrico, é utilizado o elemento PLANE42 no ANSYS. Esse elemento é usado para modelagem 2D (plana) e também serve para representar modelos axissimétricos.

O formato do transdutor também foi escolhido através da comparação entre três modelos. A forma final será semelhante à representada na figura abaixo, em que ‘U’ indica as restrições dos graus de liberdade em vermelho, ‘VOLT’ a tensão elétrica em cada nó em verde e ‘CP’ os nós acoplados em azul.

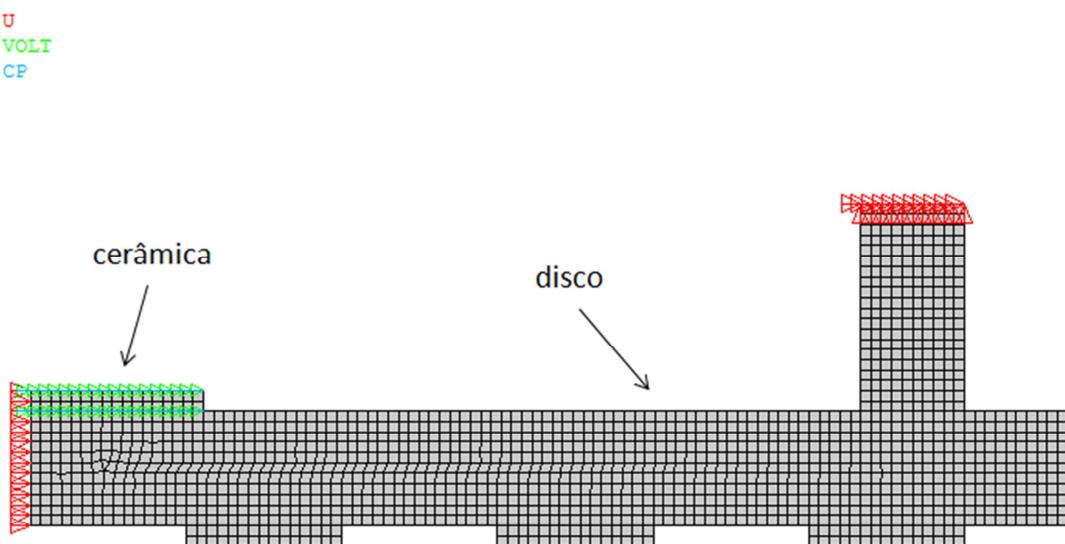


Figura 14: Modelo axissimétrico de transdutor discretizado em elementos.

Na Fig. 14, as restrições dos graus de liberdade à esquerda são devidas à simetria do modelo, sendo restrito o movimento na direção ‘x’ (radial) desses nós. As restrições na parte superior à direita são devidas ao modo de fixação do transdutor, sendo restritos os movimentos nas direções ‘x’ e ‘y’.

5.4 Cerâmica Piezelétrica

5.4.1 Análise de convergência e frequências de ressonância

Nesta etapa, deseja-se descobrir aproximadamente a velocidade de propagação da onda acústica na cerâmica, as frequências de ressonância da cerâmica e a influência da discretização (tamanho dos elementos no MEF) e do tipo de análise (harmônica ou modal) nas simulações.

As simulações foram feitas para cerâmicas de 3 diâmetros diferentes, de 10mm, 20mm e 40mm, que serão referidas como discos 1, 2 e 3, respectivamente. As espessuras são iguais para cada disco ($h = 2\text{mm}$), assim como a tensão elétrica aplicada ($V = 1\text{V}$). As frequências de ressonância desejadas são as frequências em que as cerâmicas vibrem no primeiro modo lateral e a velocidade de propagação na cerâmica é obtida pela eq. (3.16).

Os gráficos abaixo mostram os resultados obtidos para os três discos pelas análises harmônicas e modal.

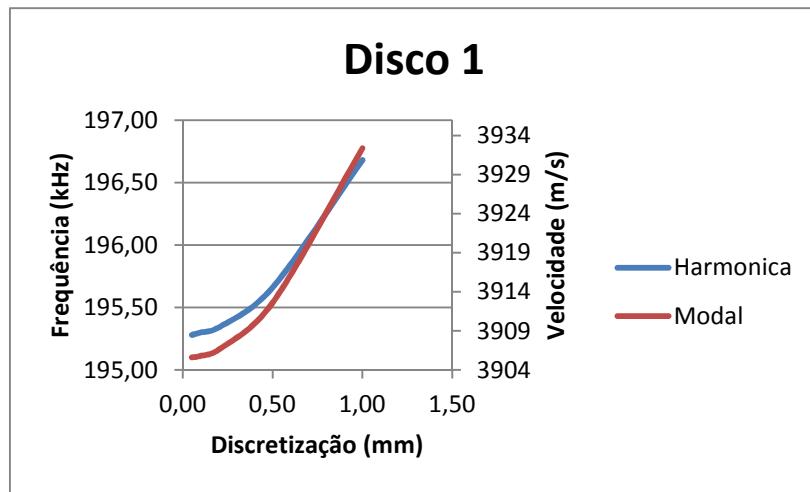


Figura 15: Valores de frequência de ressonância e velocidade da onda variando com a discretização para o disco 1.

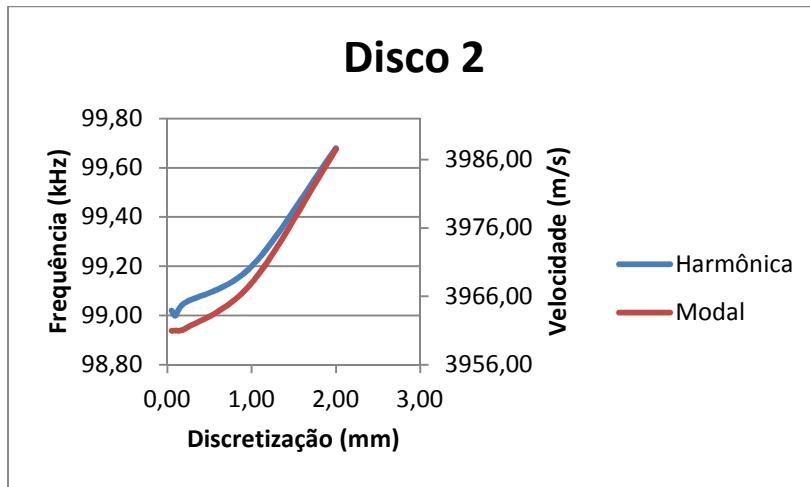


Figura 16: Valores de frequência de ressonância e velocidade da onda variando com a discretização para o disco 2.

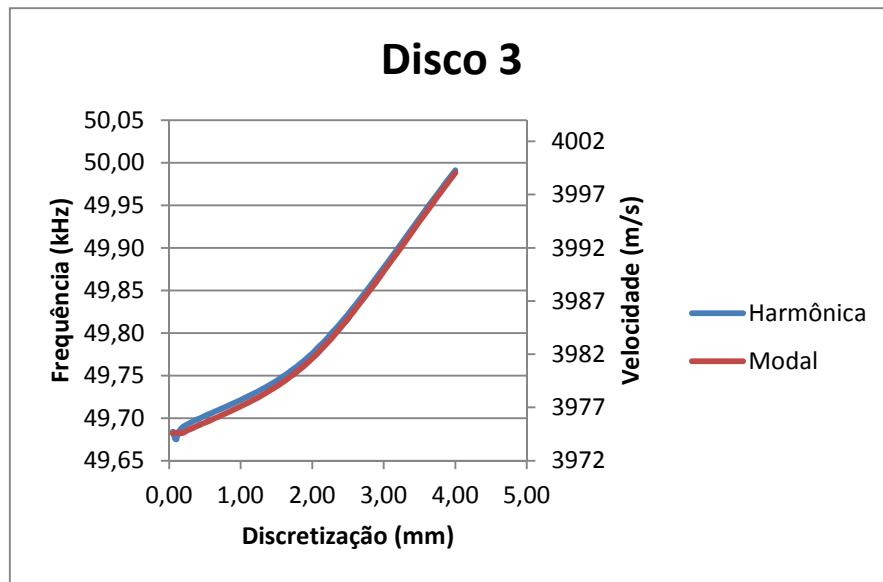


Figura 17: Valores de frequência de ressonância e velocidade da onda variando com a discretização para o disco 3.

Verifica-se que os valores de frequência de ressonância convergem ao diminuir o tamanho dos elementos na discretização. Os valores próximos de 0,5 mm são suficientes para assegurar bons resultados, pois geraram diferenças menores que 0,2% em relação à menor discretização utilizada.

Os resultados obtidos também se mostraram condizentes com os valores conhecidos da velocidade de propagação da onda longitudinal na cerâmica PZT-5A no modo de vibração lateral, que fica próxima de 4000 m/s.

A análise modal fornece resultados confiáveis de frequência de ressonância em relação a análise harmônica, visto que a diferença máxima de valores foi de 0,015% para o disco 2 com discretização de 0,2 mm.

5.4.2 Influência da espessura da cerâmica na frequência de ressonância e velocidade de propagação.

Foram calculadas as velocidades de propagação para os mesmos três discos 1, 2 e 3, porém variando-se somente sua espessura. Os resultados obtidos encontram-se no gráfico abaixo:

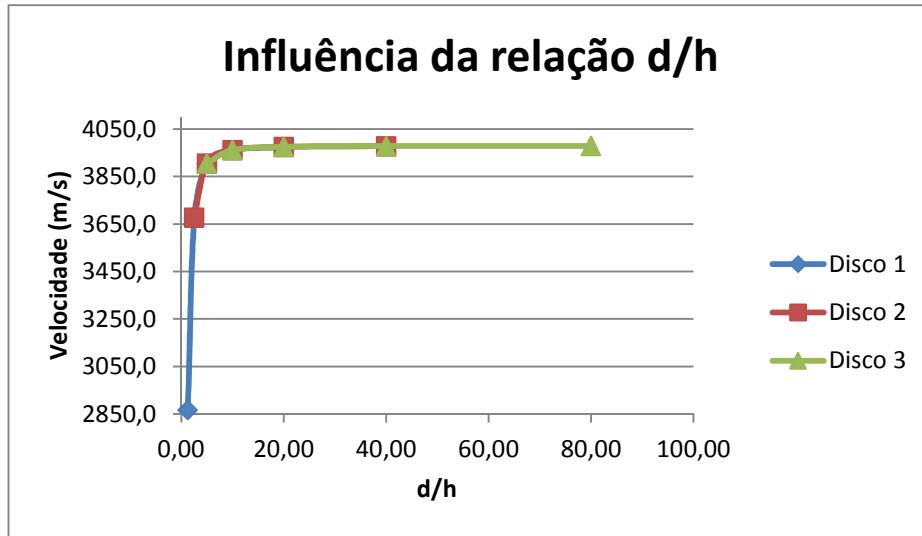


Figura 18: Influência da relação diâmetro-espessura na velocidade da onda na cerâmica.

Para os três discos foram utilizadas mesmas tensões nos eletrodos (1V) e discretizações (0,05 mm). Os resultados foram verificados com análise modal que, como visto na seção 5.4.1, se mostraram satisfatórios para cálculos de frequências de ressonância.

Em qualquer um dos discos, para se obter resultados mais próximos do esperado (menor discrepância e erro), deve-se ter uma relação d/h a maior possível. Se essa relação fica muito pequena, por exemplo, menor que 2,5, a velocidade de propagação fica muito distante do valor desejado. Isso ocorre porque pode haver sobreposição de dois ou mais modos de vibrar, devido ao formato da cerâmica, que está muito espessa e se assemelha mais a um cilindro do que a uma placa.

5.5 Disco emissor

5.5.1 Escolha do material

Para o disco ao qual a cerâmica estará colada, foram simulados três materiais: alumínio, titânio e uma *syntactic foam*.

O alumínio e o titânio são os materiais mais utilizados na construção de transdutores para emissão em ar, já que apresentam baixa perda acústica. Esse fato contribuiu para a escolha desses metais como materiais ressonadores.

Syntactic foam é a designação para materiais compósitos constituídos de uma matriz de metal, cerâmica ou polímero com microesferas ocas. Utilizou-se uma resina de epóxi como matriz e esferas ocas de vidro da 3M série S22. Esse material foi utilizado em alguns transdutores construídos no laboratório de ultrassom e tem como características ser mole e de baixa densidade.

Para este trabalho, numa frequência acima de 150 kHz, o disco deve vibrar num modo que contenha 6 círculos nodais. O material escolhido deverá satisfazer essa condição, além de fornecer melhores deslocamentos ao longo da superfície radiante.

A fim de escolher o material será considerado um transdutor simplificado, desconsiderando a forma de fixação e as ranhuras. A seguir mostram-se as configurações de discos que satisfazem a condição de vibrar com 6 círculos nodais (discretizados com $dx = 0,2\text{mm}$):



Figura 19 Syntactic Foam: freq = 92,55kHz; r = 32mm; h = 3,5mm;



Figura 20: Titânio: freq = 200,5kHz; r = 34,1mm; h = 3mm;



Figura 21: Alumínio: freq = 200,06kHz; r = 34mm; h = 3 mm;

A syntactic foam, por ser pouco rígida, tem baixa frequência de ressonância, portanto para o caso especificado de 6 círculos nodais a frequência obtida foi de aproximadamente 100 kHz, o que não satisfaz os requisitos do projeto. Para utilizá-la em frequências mais altas o disco deveria ter espessura maior e diâmetro menor. Isto causa dois problemas verificados: o surgimento de mais modos de vibrar que não sejam de flexão e como os círculos nodais ficam muito próximos um do outro, a cerâmica se flexiona formando um ‘s’ deitado, como na Fig. 19, o que não é desejado, pois atrapalha seu modo de vibrar, que é um modo radial.

O alumínio e o titânio produziram configurações semelhantes de geometria do disco e frequência de ressonância (aproximadamente 200 kHz). Para o teste com o titânio (Fig. 20), a soma dos deslocamentos dos pontos da superfície radiante foi de 4,7e-7 metros. Para o teste com o alumínio (Fig. 21) a soma dos deslocamentos foi de 1,2e-5 metros.

Os deslocamentos produzidos pelo disco de alumínio chegaram a duas ordens de grandeza maiores que os do disco de titânio. Mesmo a partir deste modelo simplificado de transdutor é possível escolher o alumínio como material de trabalho sem realizar análises mais profundas.

5.5.2 Forma de fixação do transdutor

Neste trabalho será realizada otimização paramétrica do transdutor, portanto a forma do mesmo deve ser definida antes dessa etapa. Para a escolha do formato do transdutor foram testados três métodos de fixação, como mostrados abaixo:

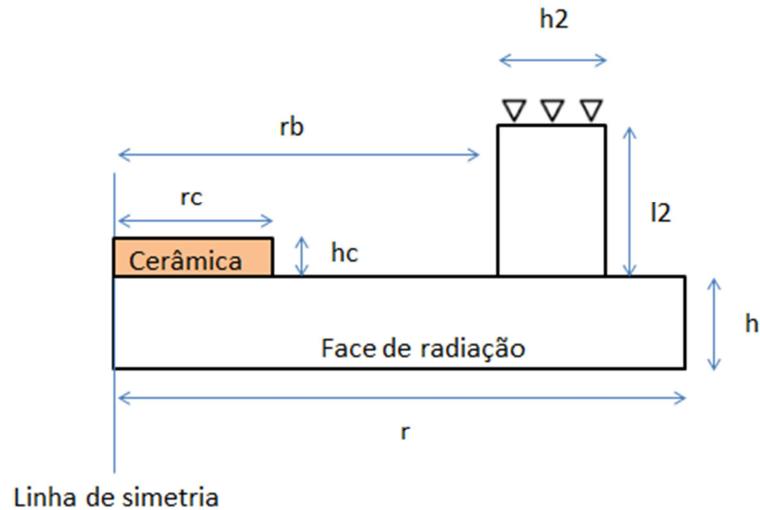


Figura 22: Primeiro modo de fixação: disco com degrau e representação dos parâmetros.

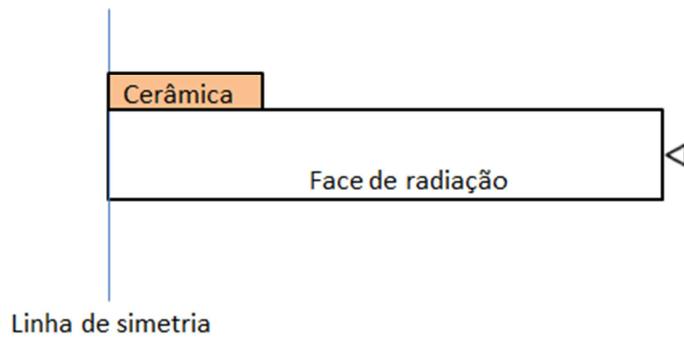


Figura 23: Segundo modo de fixação: disco engastado na linha central da lateral.

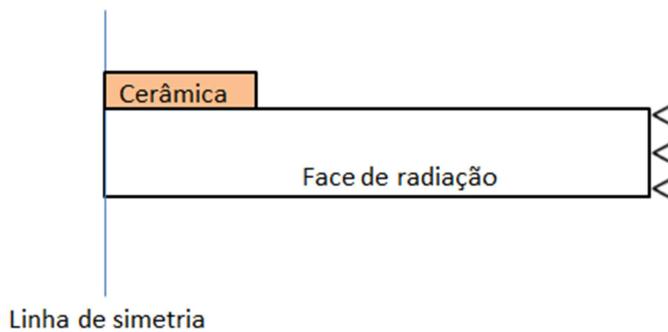


Figura 24: Terceiro modo de fixação: disco engastado em toda a lateral.

Na Fig. 22 estão representados os parâmetros do transdutor, que também são usados nas outras formas de fixação: hc e rc são a espessura e raio da cerâmica piezelétrica, h e r são a espessura e raio do disco, h_2 e l_2 são a espessura e altura do degrau (quando houver) e rb o raio interno deste degrau. A Fig. 23 mostra o modo de fixação em que somente o centro da superfície lateral do disco emissor é engastado e a Fig. 24 indica o modo de fixação com engaste em toda superfície lateral.

As três formas de fixação foram simuladas utilizando discos de alumínio como definido no item 5.5.1. Os discos foram dimensionados (r e h) para trabalhar na frequência de 200 kHz, vibrando no modo de flexão e conter 6 círculos nodais. A cerâmica utilizada é de PZT-5A, também dimensionada para vibrar a 200 kHz no primeiro modo de vibrar lateral. Os raios e as espessuras dos discos e da cerâmica são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros dos discos e da cerâmica.

	Alumínio	Cerâmica : PZT-5A
h (mm)	2,3	$hc = 0,5\text{mm}$
r (mm)	30	$rc = 5,0\text{mm}$

Para a escolha do modo de fixação, as simulações foram feitas com discos planos, análise harmônica e discretização de 0,2 mm. O critério de escolha é a fixação que permitir maior soma de deslocamentos em toda a superfície radiante. O deslocamento da superfície do disco se assemelha à Fig. 25. A amplitude no centro do disco é alta e decai até a borda.

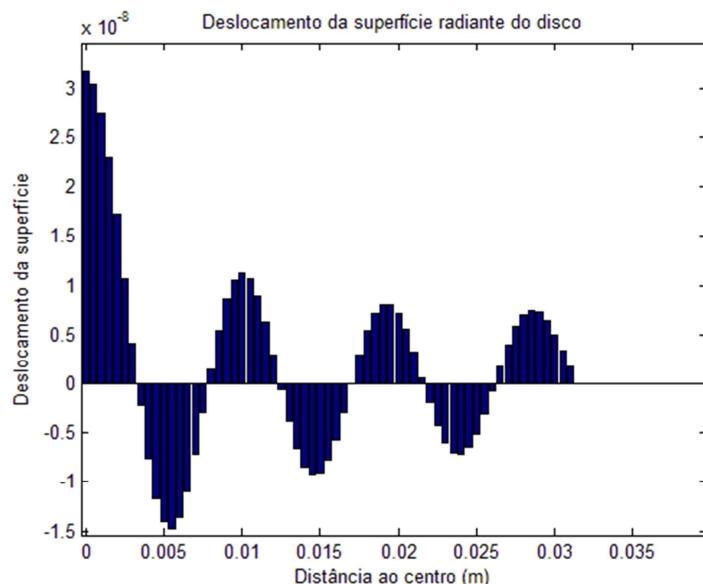


Figura 25: Deslocamento da superfície radiante de um disco plano.

Abaixo seguem os resultados obtidos para as simulações dos discos. Para os discos com degraus, como ilustrado na Fig. 22, foram feitas simulações para h_2 , l_2 e r_b diferentes; na tabela abaixo encontram-se alguns resultados. A coluna ‘Deslocamentos’ é a soma dos módulos dos deslocamentos de cada elemento da superfície radiante.

Tabela 2: Resultados para o alumínio.

Modo de fixação	h2 (mm)	l2 (mm)	r_b (mm)	Deslocamento (m)
1	5	6	25	10,00E-06
1	5,5	7,5	22,5	69,40E-06
2	-	-	-	7,60E-06
3	-	-	-	5,18E-06

Dentre os três modos de fixação do transdutor, a primeira alternativa se mostrou a melhor, por permitir configurações que geram deslocamentos até uma ordem de grandeza maior. Pela Tabela 2, verifica-se que a variação dos parâmetros h_2 , l_2 e r_b pode proporcionar geometrias de discos que favorecem maiores deslocamentos da superfície radiante em relação aos modos 2 e 3 de fixação, que cada modo permite somente um resultado. O degrau gerado no primeiro modo de fixação pode favorecer a vibração no modo de flexão do disco.

6 RESULTADOS TEÓRICOS

6.1 Caracterização da cerâmica piezelétrica

As simulações numéricas de cerâmicas piezelétricas utilizando o MEF fornecem bons resultados de seus comportamentos dinâmicos e estáticos, permitindo encontrar frequências de ressonância, deslocamentos mecânicos e outros valores de interesse. No entanto, deve-se conhecer os valores de suas constantes (elásticas, dielétricas e piezelétricas) com boa precisão. Em geral, os fabricantes fornecem valores aproximados de algumas constantes que podem

conter erros de até 20% do valor real para a cerâmica utilizada (Pérez, 2010). A caracterização da cerâmica utilizada torna-se então essencial para a precisão dos resultados.

Para simular uma piezocerâmica, como a APC850 que foi utilizada, são necessárias 5 constantes elásticas, 3 piezelétricas e 2 dielétricas, além da massa específica e características geométricas da mesma.

A caracterização pode ser dividida em 4 etapas: aquisição de dados experimentais, análise de sensibilidade de cada parâmetro nos modos de ressonância, uma aproximação dos valores através do ajuste de picos de ressonância e, por fim, um refinamento utilizando o algoritmo Nelder-Mead (Pérez, 2010).

Os três últimos passos foram realizados utilizando uma rotina desenvolvida por Pérez et al. (2010) no software Matlab, que também utiliza o ANSYS para simulação da cerâmica. Toda a sequência de caracterização será descrita a seguir.

6.1.1 Dados Experimentais

De acordo com a eq. (3.16) e os gráficos das Fig. 15 e Fig. 18, foi escolhida uma cerâmica de 10 mm de diâmetro e espessura 2 mm para ser caracterizada, cujo primeiro modo de vibrar radial é próximo de 200kHz. O material da cerâmica é o APC850, da *APC international*, comumente usado em aplicações de ultrassom.

A curva de impedância elétrica (amplitude e fase) da cerâmica foi obtida utilizando-se o analisador HP4194A, no intervalo de frequências desejado. Este intervalo contém 1000 pontos igualmente espaçados de 650Hz a 1,3MHz, de modo que dentro deste intervalo estejam presentes desde o primeiro modo radial até o primeiro modo de espessura. As componentes de condutância elétrica e de resistência elétrica podem ser vistas na Fig. 29.

A massa foi obtida através da medição por uma balança de precisão de até 5 casas decimais da Mettler-Toledo. O raio foi avaliado através do método diametral utilizando um paquímetro e a espessura também foi calculada através da média de medições realizadas em diferentes posições. O raio e espessuras foram medidos com melhor precisão do que o informado pelos fabricantes. Os dados obtidos encontram-se a seguir:

$$mc = 1,202 \text{ g};$$

$$dc = 9,85 \text{ mm};$$

$$hc = 2,05 \text{ mm};$$

o que implica:

$$\rho_c = 7962,9 \text{ kg/m}^3;$$

As constantes α e β de amortecimento da relação de Rayleigh não são calculadas nesse software, portanto são aproximadas por 40.000 e 5e-10, respectivamente.

6.1.2 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade permite descobrir a influência de cada parâmetro nos modos de ressonância e antirressonância. Realizando a análise através de um valor inicial aproximado das constantes e variando-os de -20% a +20% deste valor, o resultado obtido para uma constante é representado como na Fig. 26. Os valores iniciais podem ser obtidos através de dados do fabricante ou de valores conhecidos para este material. Como valores iniciais foram utilizados valores médios calculados de um lote de PZT5A, que equivale à cerâmica APC 850, de mesmo diâmetro e espessura, como podem ser vistos na Tabela 3.

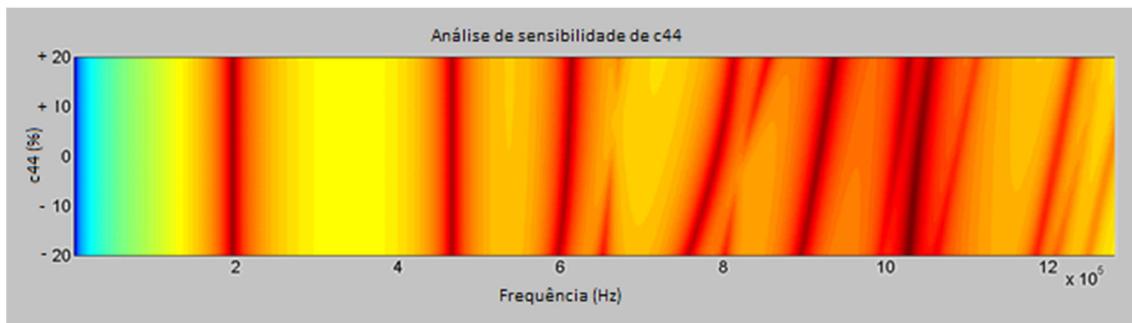


Figura 26: Gráfico da sensibilidade da constante elástica c44.

Cada linha escura do gráfico indica um modo de vibrar, quanto mais essa linha se aproximar de uma linha vertical, quer dizer que o parâmetro analisado não tem influência sobre esse modo. Pelo contrário, quanto mais inclinada for a linha, mais sensível é o modo de vibrar a variações deste parâmetro.

Tabela 3: Valores iniciais dos parâmetros

Parâmetro	Valor inicial
c_{11}	$1,314 \times 10^{11} N/m^2$
c_{12}	$8,230 \times 10^{10} N/m^2$
c_{13}	$8,680 \times 10^{10} N/m^2$
c_{33}	$1,225 \times 10^{11} N/m^2$
c_{44}	$1,920 \times 10^{10} N/m^2$
e_{31}	$-6,910 C/m^2$
e_{15}	$13,650 C/m^2$
e_{33}	$16,410 C/m^2$
ε_{11}	$9.740 \times 10^{-9} C^2/Nm^2$
ε_{33}	$6,959 \times 10^{-9} C^2/Nm^2$

Realizando a caracterização para cada uma das 10 constantes, pode-se montar a tabela abaixo mostrando resumindo a influência de cada uma delas sobre os modos de vibrar:

Tabela 4: Influência dos parâmetros nos modos de vibrar ('-' indica sem influência)

Parâmetro	Modo Radial	Modo Acoplado	Modo Espessura
c_{11}	Alta	Alta	-
c_{12}	Baixa	-	-
c_{13}	Alta	Alta	-
c_{33}	Alta	Alta	Alta
c_{44}	-	Alta	Baixa
e_{31}	Baixa	Baixa	-
e_{15}	-	Alta	-
e_{33}	-	Baixa	Alta
ε_{11}	-	Baixa	-
ε_{33}	-	Baixa	Alta

6.1.3 Aproximação inicial dos valores das constantes

Esta terceira etapa é fundamental no processo de caracterização da cerâmica, pois o passo de refinamento da solução só encontra mínimos locais. Assim, sem essa aproximação inicial, a última etapa poderia convergir para uma solução distante do valor real.

A análise de sensibilidade permite a construção de um algoritmo que ajusta os parâmetros de maior sensibilidade, ligando esses parâmetros a um ou mais erros nos picos de ressonância. A Fig. 27 mostra o exemplo de um erro num pico de ressonância.

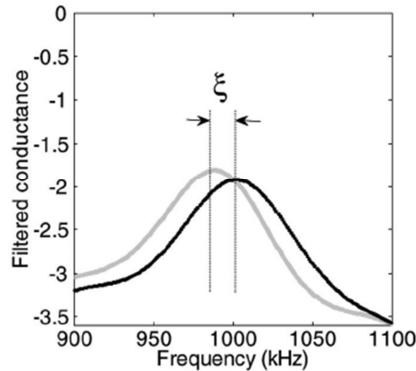


Figura 27: Erro na comparação entre os picos das curvas teóricas e experimental de condutância (Pérez, 2010).

O resultado obtido é aproximado somente para os parâmetros de maior sensibilidade e o resultado dessa etapa é utilizado como valor inicial da etapa de refinamento.

6.1.4 Refinamento da solução

O refinamento da solução é feito utilizando o algoritmo Nelder-Mead de otimização, com todas as simulações sendo realizadas no software ANSYS.

Devem ser escolhidas algumas constantes que influenciam a curva de impedância na mesma faixa de frequência e realizar o refinamento somente dessas constantes. O valor obtido após o refinamento é utilizado na próxima iteração como valor inicial da terceira etapa. Sendo que nas outras iterações são escolhidos novos conjuntos de constantes a serem refinadas. Dessa forma os valores de alguns parâmetros não precisam necessariamente ser refinados e são obtidos através das diversas passagens pela etapa três. O diagrama da Fig. 28 indica a sequência utilizada na caracterização:

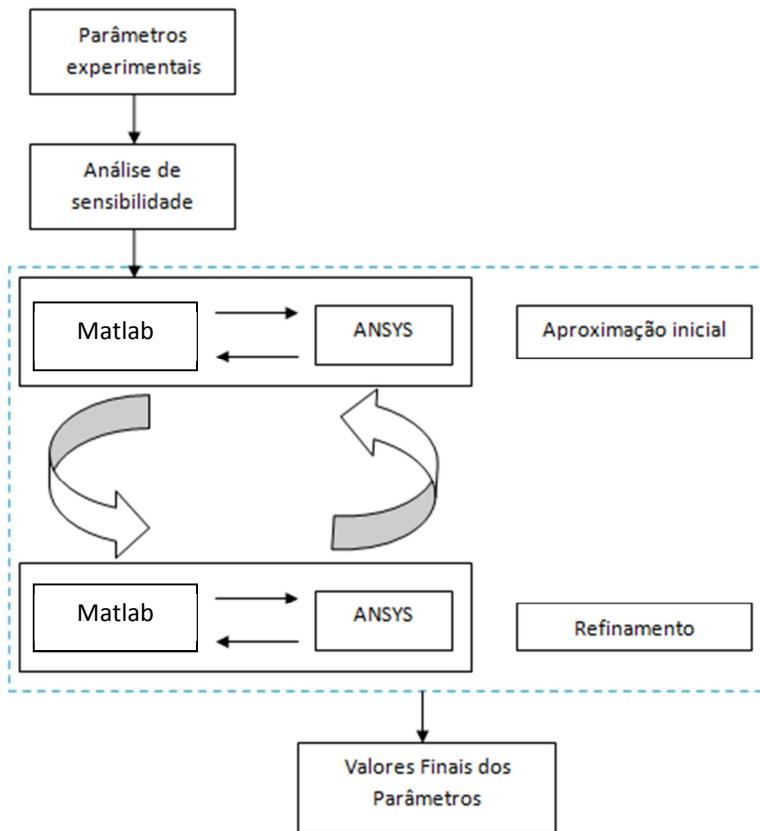


Figura 28: Fluxograma de funcionamento do software de caracterização da cerâmica.

A sequência de caracterização da cerâmica APC850 consistiu de duas iterações, ou seja, duas passagens pelas etapas 3 e 4. Na primeira iteração as constantes c_{12} , ϵ_{33} e e_{31} são refinadas e, na segunda iteração são refinados os parâmetros e_{15} , c_{44} , ϵ_{11} e e_{33} . As demais constantes são obtidas pelas duas passagens pela etapa 3 (aproximação inicial).

A Fig. 29 mostra a comparação entre as curvas experimental e ajustada da amplitude da condutância elétrica (G) e da resistência elétrica (R).

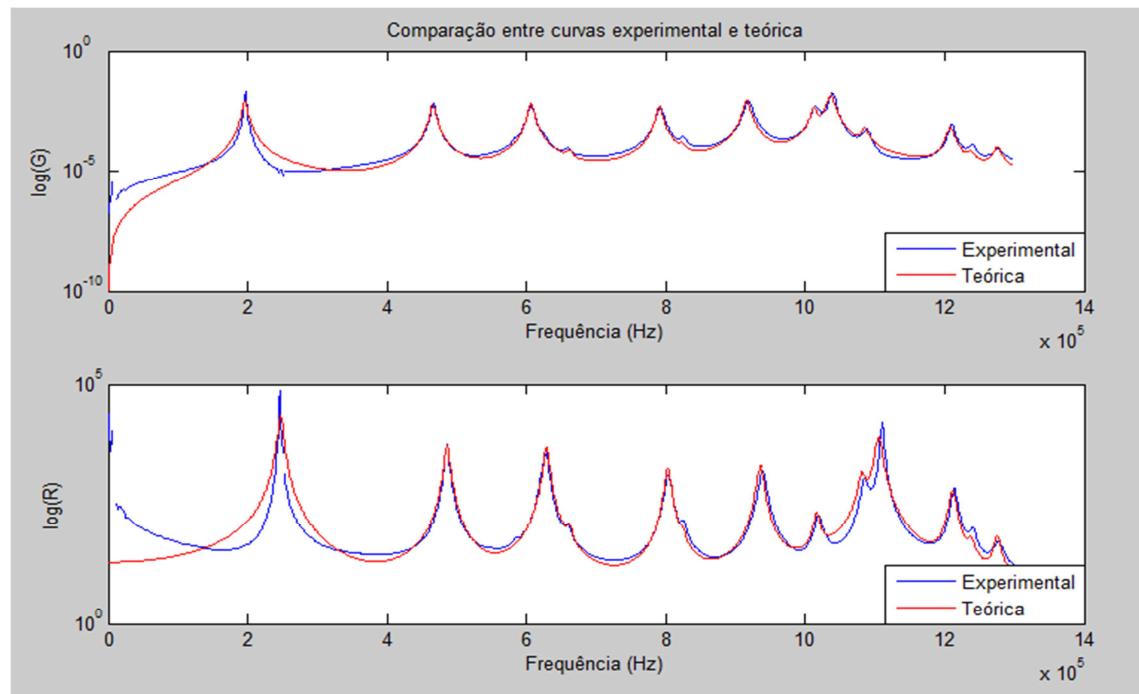


Figura 29: Comparação entre as curvas experimental e simulada de condutância (acima) e de resistência (abaixo).

A Tabela 5 mostra os valores finais obtidos das constantes após a caracterização.

Tabela 5: Valores das constantes após a caracterização.

Parâmetro	Valor final
c_{11}	1,3079e11 N/m^2
c_{12}	8,1266e10 N/m^2
c_{13}	8,6481e10 N/m^2
c_{33}	1,2292e11 N/m^2
c_{44}	1,9171e10 N/m^2
e_{31}	-7,1300 C/m^2
e_{15}	13,0670 C/m^2
e_{33}	15,3052 C/m^2
ϵ_{11}	9,4150e-9 C^2/Nm^2
ϵ_{33}	6,2893e-9 C^2/Nm^2

6.2 Protótipo Inicial

O transdutor otimizado será comparado com um protótipo inicial, o qual será construído adicionando-se ranhuras à geometria do disco emissor escolhida no item 5.5, com o material escolhido sendo o alumínio. Inicialmente, calculam-se os diâmetros nodais da placa de alumínio e adicionam-se as ranhuras nas regiões em que o deslocamento é negativo. A presença das ranhuras afeta a modo de vibrar do disco, assim, há a necessidade de correção da posição e tamanho das ranhuras, até que o ocorra a convergência.

Utilizando como parâmetros do transdutor os valores da melhor configuração descrita na Tabela 2, os diâmetros nodais obtidos da simulação sem as ranhuras são:

Tabela 6: Diâmetros nodais do disco sem ranhuras.

d1	d2	d3	d4	d5	d6
3,48	9,15	12,12	18,14	23,41	28,26

Após o ajuste das ranhuras, as posições dos círculos nodais mudaram para:

Tabela 7: Posição das ranhuras.

d1	d2	d3	d4	d5	d6
3,4	8	12,8	17,6	22,8	28,2

A análise harmônica do protótipo inicial com ranhuras forneceu uma vibração como a mostrada na Fig. 30, cuja frequência de ressonância encontrada foi de 194 kHz e pode ser vista pela curva de impedância elétrica na Fig. 31 :

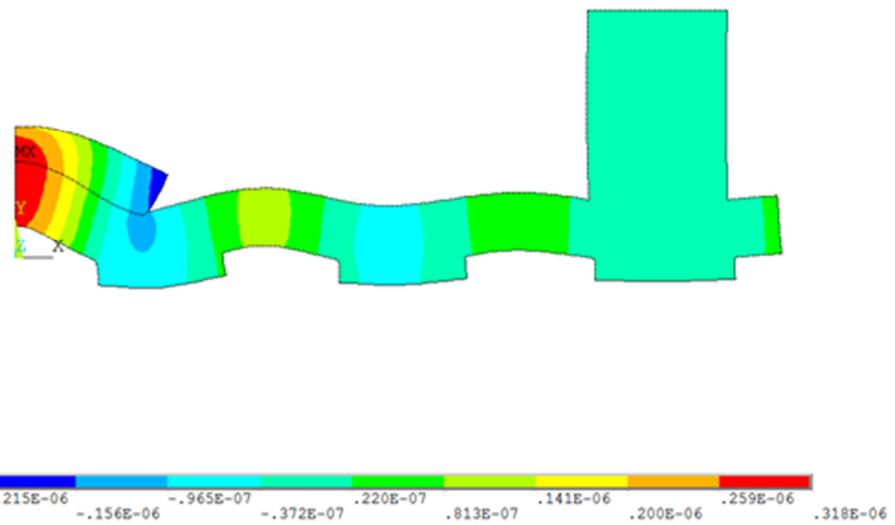


Figura 30: Simulação do protótipo inicial.

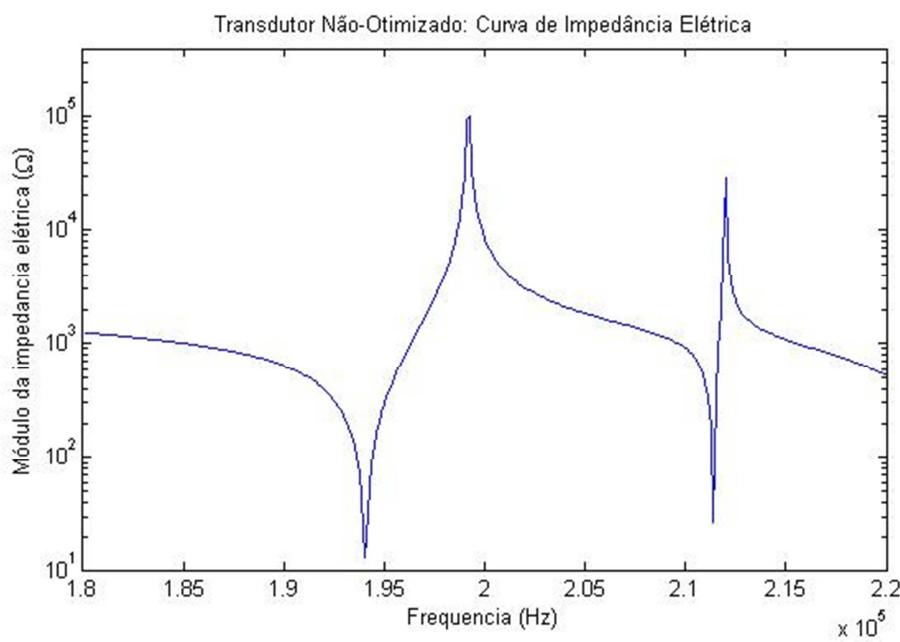


Figura 31: Curva de impedância elétrica do protótipo inicial.

O desenho de fabricação do protótipo inicial encontra-se no Anexo A. A Fig. 32 mostra o protótipo após a fabricação.

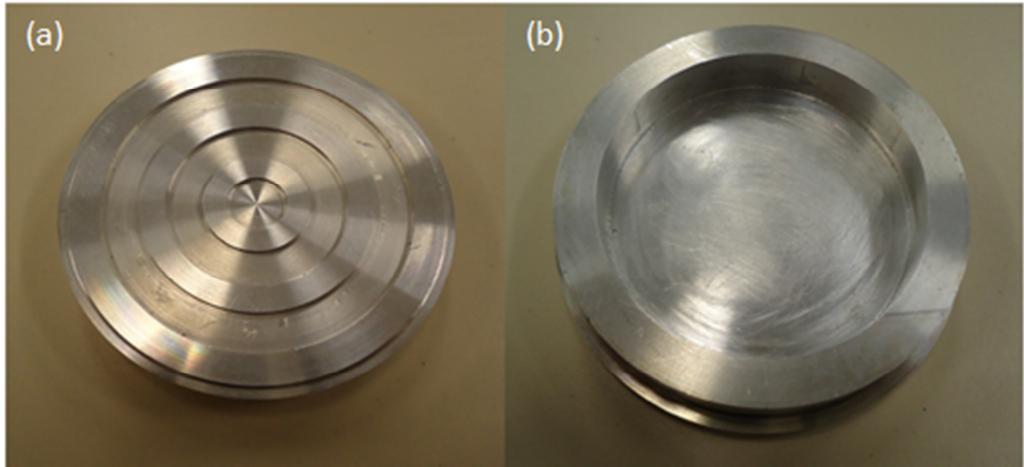


Figura 32: Disco emissor: (a) face de radiação com ranhuras e (b) face posterior.

6.3 Protótipo Otimizado

6.3.1 Otimização Paramétrica

Da equação (3.19) conclui-se que quanto maior a velocidade normal na face do transdutor, maior será a pressão calculada no ponto considerado. Considerando uma frequência de vibração fixa, a velocidade normal na face do transdutor será tanto maior quanto maior forem os deslocamentos na superfície.

Para a formulação do problema de otimização será utilizada a notação d_i para representar o tamanho da ranhura i , como na Fig. 33 e y_i^j para representar os deslocamentos do elemento j da ranhura i na direção axial do transdutor, como na Fig. 34. Sendo que a ranhura 1 está localizada no centro do disco e a ranhura 7 é a ranhura mais externa. Pela definição e pela Fig. 33, as ranhuras ímpares são internas enquanto as pares são externas.

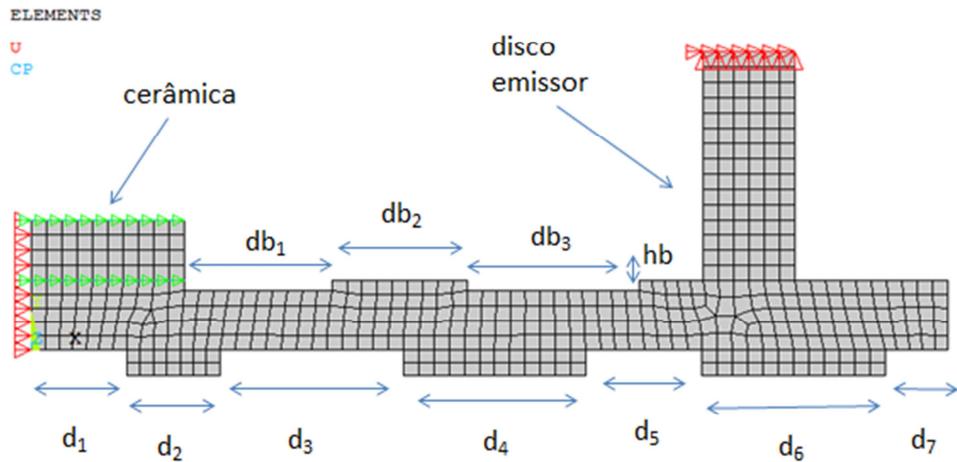


Figura 33: Transdutor e definições das ranhuras na face emissora (d_i) e na face oposta (db_i) e espessura das ranhuras na face oposta (hb).

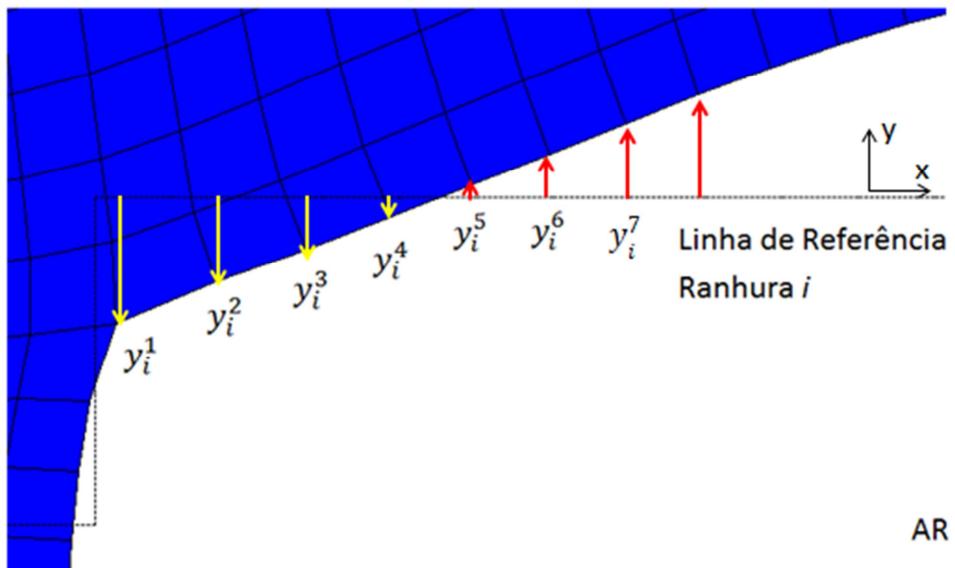


Figura 34: Definição dos deslocamentos de cada elemento; setas amarelas indicam deslocamentos negativos e setas vermelhas, deslocamentos positivos.

Mesmo após a adição de ranhuras, algumas regiões da superfície do transdutor vibram no sentido oposto ao desejado. Nas ranhuras internas (ímpares), deseja-se que a superfície vibre no sentido de entrar no transdutor (definido como positivo) e nas ranhuras externas (pares), no sentido de sair do transdutor (definido como negativo). O valor do deslocamento é obtido pela posição axial de cada elemento em relação à linha de referência de sua respectiva ranhura.

A amplitude de vibração no disco é alta no centro e decai até a borda. Isso leva a otimização a ajustar somente as ranhuras centrais com os deslocamentos, enquanto o resto do disco vibra com deslocamentos opostos ao desejado. Assim, foram dados pesos aos deslocamentos da superfície do disco, de modo que as regiões centrais tenham pesos menores. Os valores dos pesos foram escolhidos através de tentativa e erro, após alguns testes durante a implementação do programa.

Sejam p_i^j os valores dos deslocamentos com pesos que foram definidos como:

$$p_i^j = \begin{cases} 0,7y_i^j, & i=1,2 \\ 1,0y_i^j, & i=3,4 \\ 1,3y_i^j, & i=5,6 \\ 0,5y_i^j, & i=7 \end{cases} \quad (6.1)$$

Nota-se que a última ranhura tem um peso pequeno, pois ela situa-se numa extremidade livre e em alguns casos ela poderia ter altas amplitudes de vibrações, ocorrendo algo semelhante ao que ocorria no centro do disco.

Definiu-se $_{de}p_i$ e $_{di}p_i$ como a soma dos deslocamentos desejados com peso das ranhuras externas e internas, respectivamente. Analogamente, definiu-se $_{ne}p_i$ e $_{ni}p_i$ como a soma dos deslocamentos não desejados com peso das ranhuras externas e internas. Assim:

$$\begin{aligned} _{de}p &= \sum |p_i^j|, \quad \text{se } p_i^j < 0 \text{ e } i \text{ é par;} \\ _{di}p &= \sum p_i^j, \quad \text{se } p_i^j > 0 \text{ e } i \text{ é ímpar;} \\ _{ne}p &= \sum p_i^j, \quad \text{se } p_i^j > 0 \text{ e } i \text{ é par;} \\ _{ni}p &= \sum |p_i^j|, \quad \text{se } p_i^j < 0 \text{ e } i \text{ é ímpar;} \end{aligned} \quad (6.2)$$

A formulação do problema de otimização fica:

Minimizar

$$f(y_i^j) = 1,2(_{ne}p + _{ni}p) - (_{de}p + _{di}p)$$

tal que

$$\begin{aligned}
d_i - 3 \cdot 10^{-3} &\geq 0, \quad i = 1, \dots, 6 \\
d_i - 9 \cdot 10^{-3} &\leq 0, \quad i = 1, \dots, 6 \\
\sum_{i=1}^6 d_i - 28 \cdot 10^{-3} &\leq 0
\end{aligned} \tag{6.3}$$

Na função objetivo há um novo peso maior que 1 para os deslocamentos não desejados. As restrições são dadas pela geometria transdutor em que a faixa do tamanho das ranhuras é de 3 a 9 mm e a soma das seis primeiras ranhuras deve ser menor ou igual a 28 mm.

O valor da função objetivo ao final da otimização foi avaliado em $-2,2763 \cdot 10^{-5}$ mm. Os valores das posições das ranhuras encontram-se na Tabela 8 e a simulação é mostrada na Fig. 35. Observa-se que o valor de h_2 foi modificado para 3 mm após a construção do protótipo inicial pois, apesar dos testes feitos no item 5.5.2, este valor mostrou-se melhor em termos de amplitude de vibração da superfície com a adição de ranhuras.

Tabela 8: Resultado após a primeira otimização.

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
3,0 mm	5,4 mm	3,0 mm	5,4 mm	5,4 mm	5,4 mm

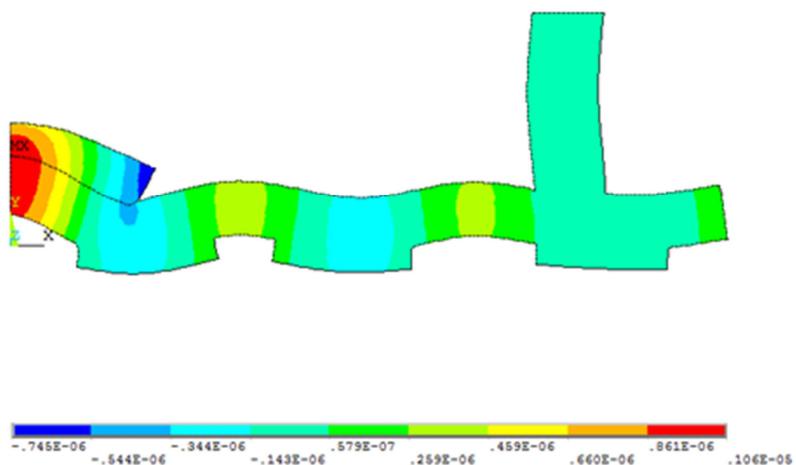


Figura 35: Simulação do transdutor com ranhuras na face frontal, com frequência de 197,4kHz.

A otimização realizada levou em consideração somente as ranhuras na face de radiação do transdutor. No entanto, foi decidido trabalhar com ranhuras em ambas as faces do disco emissor, pois esta configuração proporciona maior uniformidade de deslocamentos na superfície radiante. A fim de não aumentar o número de variáveis de projeto e o tempo de realização da otimização, foi realizada uma nova otimização com a configuração obtida anteriormente, no entanto, variando-se somente as ranhuras na face de trás.

A função objetivo utilizada foi a mesma, porém a nova formulação do problema ficou:

Minimizar

$$f(y_i^j) = 1,2(nep + nlp) - (dep + dip)$$

tal que

$$db_i - 1 \cdot 10^{-3} \geq 0, \quad i = 1,2,3$$

$$db_i - 6 \cdot 10^{-3} \leq 0, \quad i = 1,2,3$$

$$db_4 - 0,25 \cdot 10^{-3} \geq 0,$$

$$db_4 - 1,5 \cdot 10^{-3} \leq 0,$$

$$\sum_{i=1}^3 d_i - (r_b - r_c - 0,5 \cdot 10^{-3}) \leq 0 \quad (6.4)$$

Após a segunda etapa da otimização o valor da função objetivo foi de $-2,7023 \cdot 10^{-5}$ mm, indicando que a nova configuração de transdutor melhorou em relação à anterior. Os valores das posições das ranhuras encontram-se na Tabela 9 e a simulação é mostrada na Fig. 35:

Tabela 9: Resultado após otimização das ranhuras na face oposta.

db ₁	db ₂	db ₃	hb
4,8 mm	4,4 mm	5,6 mm	0,32 mm

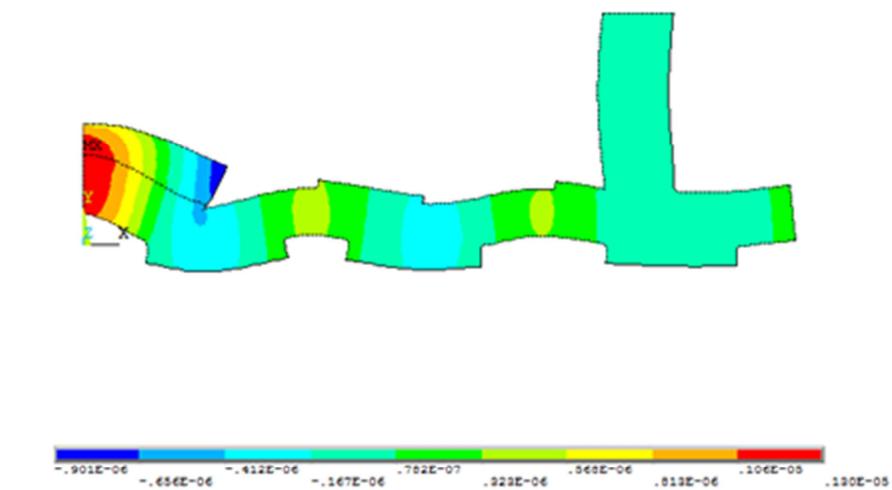


Figura 36: Simulação do transdutor com ranhuras em ambas as faces, com frequência de 190,9kHz.

Como o processo de desenvolvimento do transdutor foi feito de modo iterativo, foi realizada uma nova otimização nas ranhuras da face emissora, como na eq. (6.3), de modo a ajustar novamente as posições das ranhuras na face de radiação. O resultado final da função objetivo foi de $-2,9565 \cdot 10^{-5}$ mm, resultado melhor que os obtidos nas duas etapas de otimização anteriores.

A posição final das ranhuras encontram-se nas tabelas 10 e 11, a simulação do transdutor é representada na Fig. 37 e a Fig. 38 mostra a curva de impedância elétrica do transdutor otimizado. A Fig. 39 mostra o disco emissor construído enquanto o desenho de fabricação encontra-se no Anexo B..

Tabela 10: Configuração final das ranhuras na face de radiação.

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
3,1 mm	3,3 mm	5,8 mm	5,0 mm	4,7 mm	6,0 mm

Tabela 11: Configuração final das ranhuras na face oposta.

db_1	db_2	db_3	hb
4,8 mm	4,4 mm	5,6 mm	0,32 mm

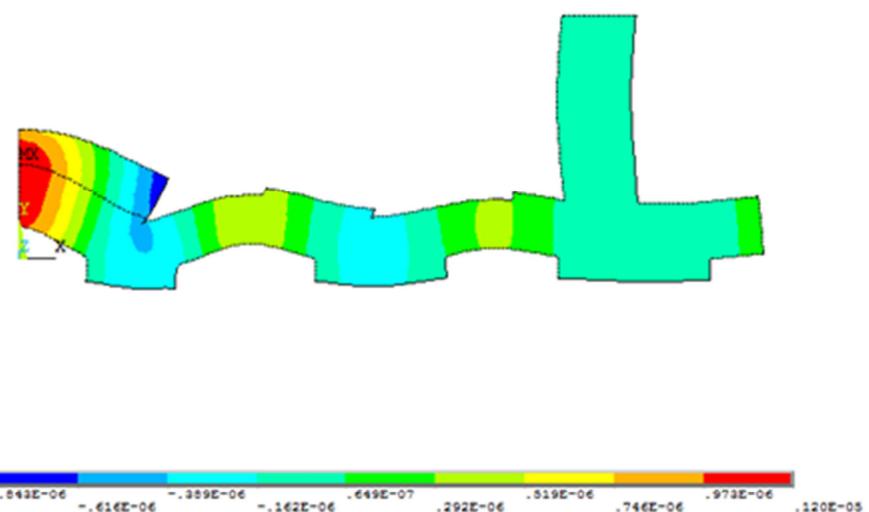


Figura 37: Simulação da configuração final do transdutor, com frequência de 188,4kHz.

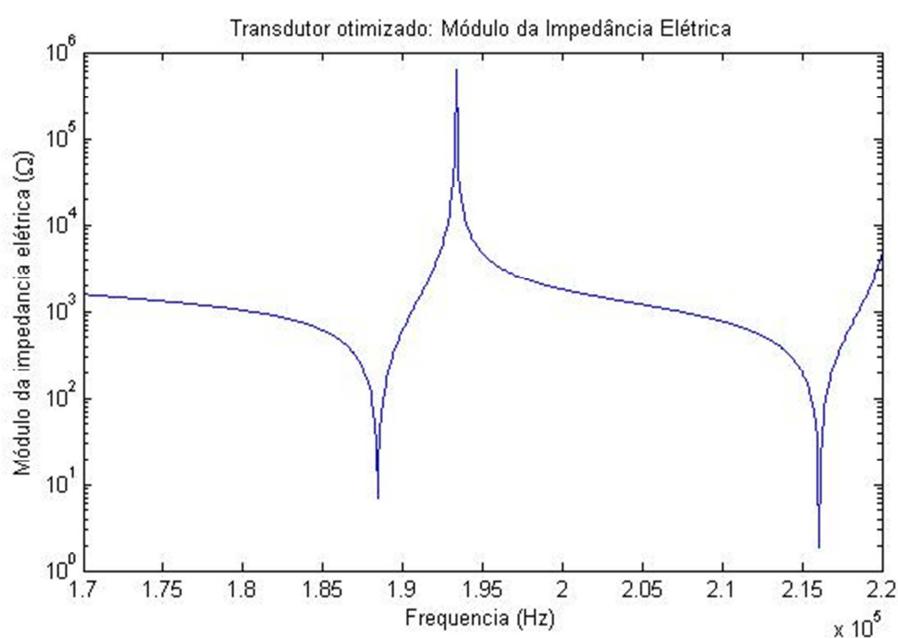


Figura 38: Curva de impedância elétrica do transdutor otimizado. A frequência de ressonância do modo desejado é de 188,4 kHz.

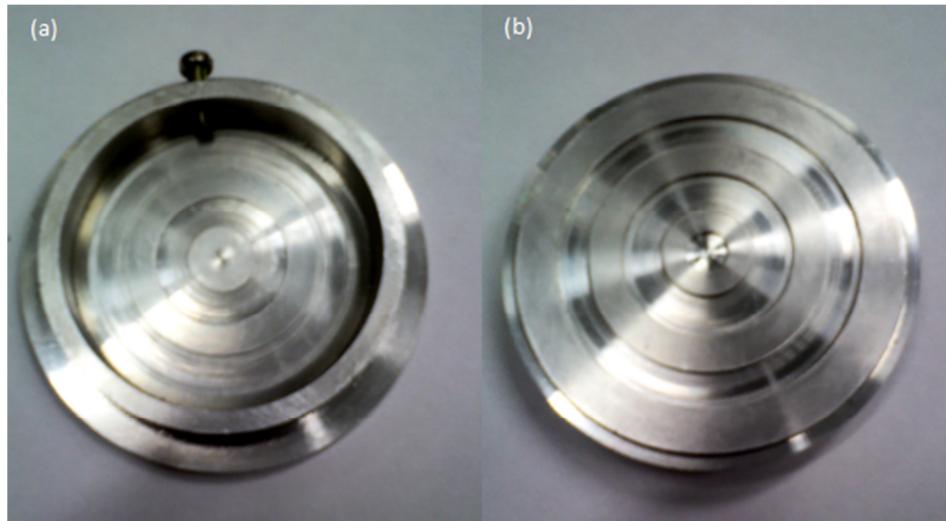


Figura 39: Disco emissor do transdutor otimizado: (a) face posterior, (b) face de radiação.

6.3.2 Parâmetros do algoritmo genético

Para uma melhor utilização do algoritmo genético devem ser estabelecidos os valores de alguns parâmetros necessários para se realizar a otimização. Os parâmetros dados na Tabela 12 são os valores padrão utilizados no software Matlab. Estes valores não foram alterados na realização das otimizações devido ao tempo elevado de cada processo. Variá-los a fim de obter o melhor valor de cada um no problema proposto seria muito custoso, aumentando muito o tempo de realização do projeto.

Tabela 12: Parâmetros padrão do algoritmo genético do Matlab.

<i>CrossoverFraction</i>	0,8
<i>EliteCount</i>	2
<i>InitialPenalty</i>	10
<i>MigrationFraction</i>	0,2
<i>MigrationInterval</i>	20
<i>Generations</i>	100
<i>PopulationSize</i>	20
<i>StallGenLimit</i>	50

Em que os parâmetros são respectivamente, fração de *crossover*, número de indivíduos de elite (que continuam na próxima geração), parâmetro de penalidade inicial, fração de migração, intervalo de migração, número de gerações, tamanho da população e número limite de gerações estáveis. Outros parâmetros não indicados na Tabela 12 foram utilizados com os valores padrão do Matlab.

Os parâmetros de número de gerações, tamanho da população e de número limite de gerações estáveis foram utilizadas com seus valores padrão nos primeiros testes realizados e, após a verificação de alguns resultados, tiveram seus valores alterados para diminuir o custo computacional sem prejudicar a solução do problema. A primeira otimização realizada teve duração de aproximadamente 72 horas com os valores descritos na Tabela 12. O tempo elevado foi devido a dois motivos principais: a simulação pelo MEF só realizava análise harmônica numa faixa grande de frequências e o número de gerações e número limite de gerações estáveis estavam muito elevados, de modo que o programa só terminava após vários resultados repetidos, considerando-se a precisão desejada da solução. A fim de resolver o problema, os valores foram corrigidos, como mostrados na Tabela 13.

Tabela 13: Valores finais dos parâmetros do algoritmo genético.

<i>Generations</i>	40
<i>PopulationSize</i>	40
<i>StallGenLimit</i>	10

O algoritmo também foi modificado, realizando inicialmente uma análise modal para encontrar a frequência de ressonância e em seguida foi realizada a análise harmônica numa faixa estreita de frequências em volta da ressonância, como pode ser visto no item 6.3.3. A modificação do algoritmo e a correção dos parâmetros permitiram que a otimização fosse completada em menos de 20 horas.

As restrições do problema de otimização foram feitas de modo que o algoritmo de otimização tivesse uma folga entre os valores das variáveis de projeto e a geometria do problema, ou seja, mesmo que as restrições não fossem respeitadas com uma certa tolerância o Ansys conseguiria simular o MEF do transdutor. O parâmetro *TolCon* do Matlab que indica

a tolerância máxima que pode ser desrespeitada nas restrições foi utilizado com o valor de 1e-6, ou seja, as restrições poderiam ser desrespeitadas em até 1mm. O valor absoluto de tolerância utilizado, *TolFun*, foi de 1e-8, ou seja, a otimização terminava se a diferença entre os melhores resultados fosse menor que 0,01mm no tamanho de cada parâmetro.

6.3.3 Descrição do algoritmo

O algoritmo que realiza a otimização paramétrica do transdutor foi feito utilizando-se os *softwares* Matlab e Ansys. As rotinas criadas para a solução do problema foram implementadas na linguagem do Matlab e a simulação do transdutor em cada etapa da otimização foi feita pelo ANSYS. As principais funções criadas são descritas a seguir:

Main:

Arquivo principal do programa, ele define o valor de algumas variáveis e diretórios, impõe as restrições do problema de otimização e faz a chamada do algoritmo genético (*ga()*);

Obj_fun(x):

Função objetivo da otimização. Recebe o vetor *x* com o valor das variáveis de projeto definidas pelo algoritmo genético, a partir dele cria o vetor *d* com as posições radiais das ranhuras, e faz a chamada do ANSYS para simulação do transdutor em elementos finitos.

Para diminuir o tempo de cada laço é realizada uma análise modal do transdutor para encontrar aproximadamente a frequência de ressonância de cada configuração do transdutor e, a seguir, a análise harmônica para obter o valor dos deslocamentos. O algoritmo fica mais rápido pois a análise modal é mais rápida e permite encontrar as frequências de ressonância e a análise harmônica é realizada numa faixa de frequências próxima da desejada.

O ANSYS gera um arquivo com os valores de deslocamento de cada elemento da superfície de radiação do transdutor, a função *Obj_fun()* lê o arquivo, calcula o valor da função objetivo e imprime na tela. Para se ter maior controle do que ocorre em cada iteração, a função também imprime na tela o tempo de execução de cada laço, o número do laço e a

posição e o tamanho das ranhuras. Como o ANSYS é executado no modo *batch*, isto é, sem abrir a janela gráfica, a função *Obj_fun()* também desenha o transdutor e o deslocamento de sua superfície radiante em uma janela à parte. A função também cria um arquivo de texto que contém todas as configurações de transdutores simulados e o valor da função objetivo de cada um.

AnModal(d,f1,f2):

Função que recebe a posição *d* das ranhuras e a faixa de frequências (*f1-f2*) em que será procurado o modo de vibrar desejado e realiza a análise modal. A faixa de frequências utilizada foi entre 185kHz e 215kHz, sendo que cada parte do transdutor foi projetada para vibrar a 200kHz. Esta função retorna o valor de frequência do primeiro modo de vibrar encontrado no intervalo.

Podem ocorrer três casos ao se procurar um modo de vibrar no intervalo desejado: nenhum modo de vibrar é encontrado, um modo de vibrar de corpo rígido é encontrado, ou é encontrado algum modo de vibrar no intervalo e que não seja de corpo rígido.

Se ocorrer o primeiro caso, o ANSYS não realiza a análise harmônica e o valor da função objetivo é retornado, por *Obj_fun()*, como zero. O segundo caso ocorre se o modo de vibrar possui frequências de ressonância e antirressonância iguais, a função *AnModal()* calcula as duas frequências e caso elas sejam iguais a *f* ela procura um novo modo de vibrar no intervalo *f - f2*, podendo encontrar outro modo de vibrar, ou não. Se ocorrer o terceiro caso, ela simplesmente retorna o valor de frequência encontrado.

Nota-se que o algoritmo não garante que o modo de vibrar encontrado é o que contém 6 círculos nodais. No entanto, como o intervalo de frequências está próximo do projetado, 200kHz, o que geralmente ocorre durante a execução do programa é que ou nenhum modo de vibrar é encontrado na faixa de frequências estipulada ou o modo de vibrar desejado, com 6 círculos nodais é encontrado, como pode ser visto nas configurações obtidas pelas figuras 35, 36 e 37. O algoritmo também não garante que o modo encontrado de vibração do disco seja um modo de flexão, por isso, para encontrar a ressonância, verificou-se em que frequência um ponto da superfície radiante do disco tinha maior deslocamento axial. O ponto escolhido foi o ponto do centro do transdutor na superfície radiante. Essa técnica permite encontrar o modo de flexão com maior segurança do que utilizar a curva de impedância elétrica, pois esse modo

é o que tem maiores deslocamentos axiais e a curva de impedância não possibilita a distinção entre os modos de vibrar.

APDL e APDL2:

Funções que escrevem um arquivo de texto com a programação da análise em elementos finitos em linguagem que é lida e interpretada pelo ANSYS. A função *APDL* gera o arquivo que realiza a análise harmônica e salva o arquivo ‘vetor.out’, que contém os valores de deslocamento de cada elemento da superfície de radiação. A função *APDL2* realiza a análise modal encontrando as frequências de ressonância ou antirressonância dependendo do caso desejado em *AnModal()*.

O fluxograma a seguir mostra o funcionamento das principais funções do programa.

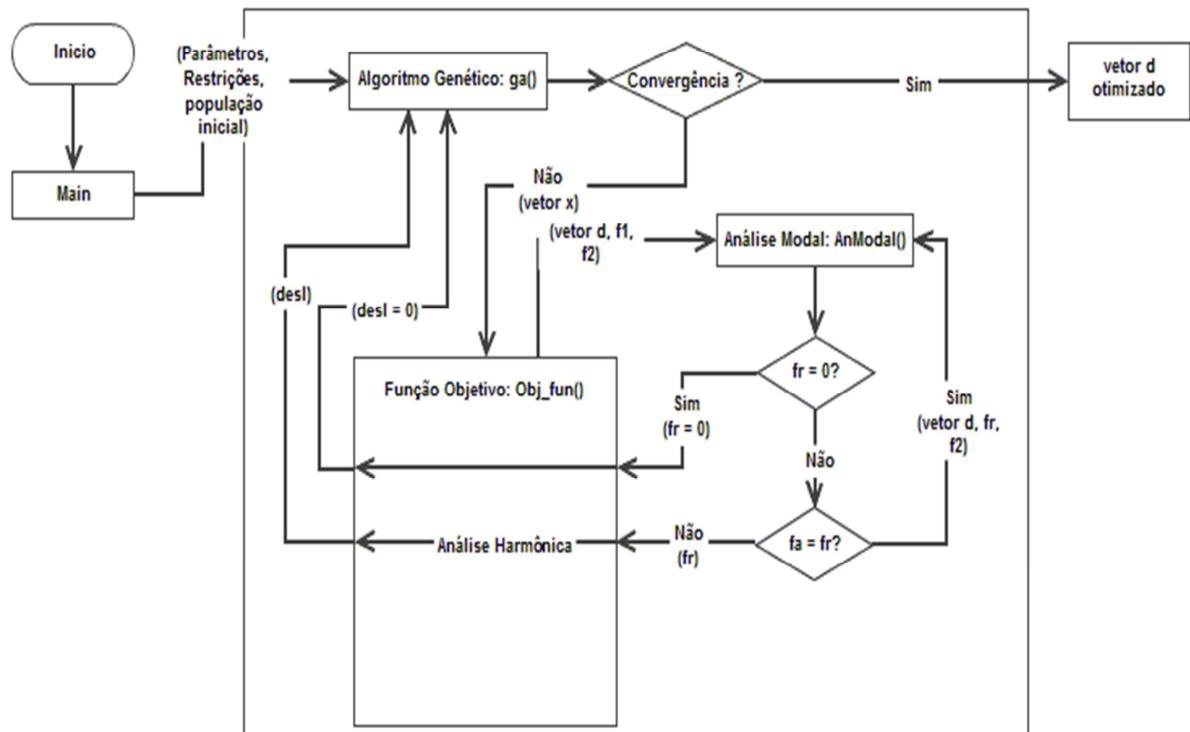


Figura 40: Fluxograma - exemplo do algoritmo de otimização.

No fluxograma, fr , fa e $desl$, são as frequências de ressonância e antirressonância e o valor da função objetivo respectivamente. As outras variáveis têm nomes como definidos nas descrições das funções criadas. As variáveis entre parênteses são os valores enviados para a próxima função indicada pela seta.

7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A fim de validar os resultados teóricos foram realizadas verificações de desempenho, calculando a impedância elétrica, os deslocamentos normais à superfície de radiação e a amplitude dos sinais emitidos para ambos os transdutores. Os resultados visam comparar os transdutores com as simulações e também compará-los entre si.

7.1 Fabricação dos Transdutores

Os discos emissores dos dois transdutores, o protótipo inicial e o otimizado, foram construídos a partir de tarugos de alumínio torneados. O material foi escolhido no item 5.5.1 e os desenhos de fabricação dos discos emissores encontram-se nos Anexo A e Anexo B.

A cerâmica piezelétrica foi colada no disco emissor com uma epóxi condutiva e com o referencial de aterramento ligado ao disco emissor. Os eletrodos são fios, sendo que um deles está soldado na cerâmica enquanto o outro está preso ao disco emissor por meio de um parafuso.

Os transdutores constituídos de um disco emissor, uma cerâmica e dois eletrodos foram fixados numa placa com um furo central através de fitas adesivas dupla face, como é mostrado na Fig. 41.

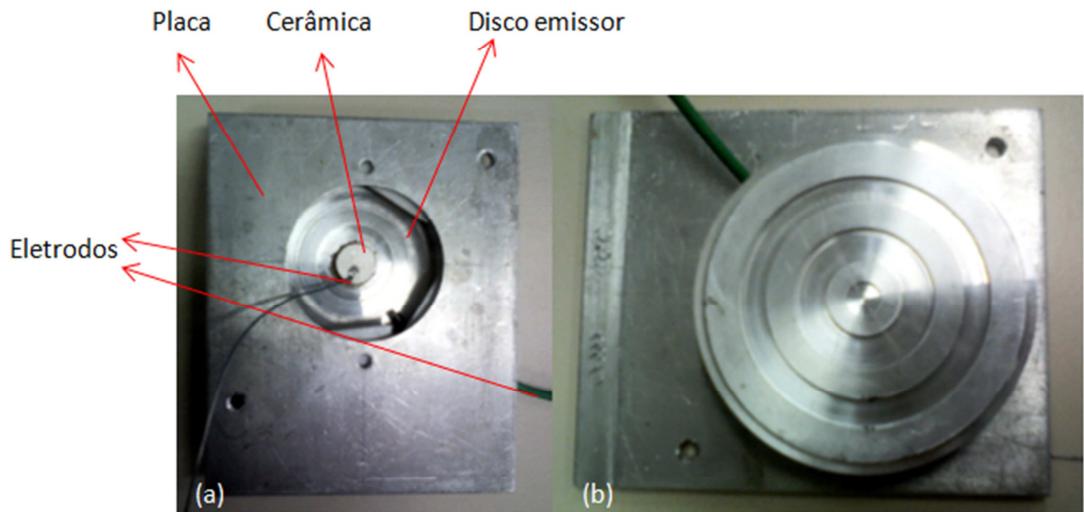


Figura 41: Transdutor montado: (a) face posterior, (b) face de emissão.

7.2 Curvas de Impedância Elétrica

A verificação da frequência de ressonância dos transdutores construídos é feita através da comparação das curvas de impedância elétrica. As curvas foram obtidas através do impedômetro fasorial HP 4194A, como mostrado na montagem da Fig. 42. A faixa de frequência utilizada era próxima à frequência de ressonância de cada transdutor e encontram-se nas Fig. 43 e Fig. 44. O impedômetro estava ligado a um computador por um canal serial e os dados eram obtidos através do *software Matlab*.



Figura 42: Montagem do transdutor no impedômetro fasorial.

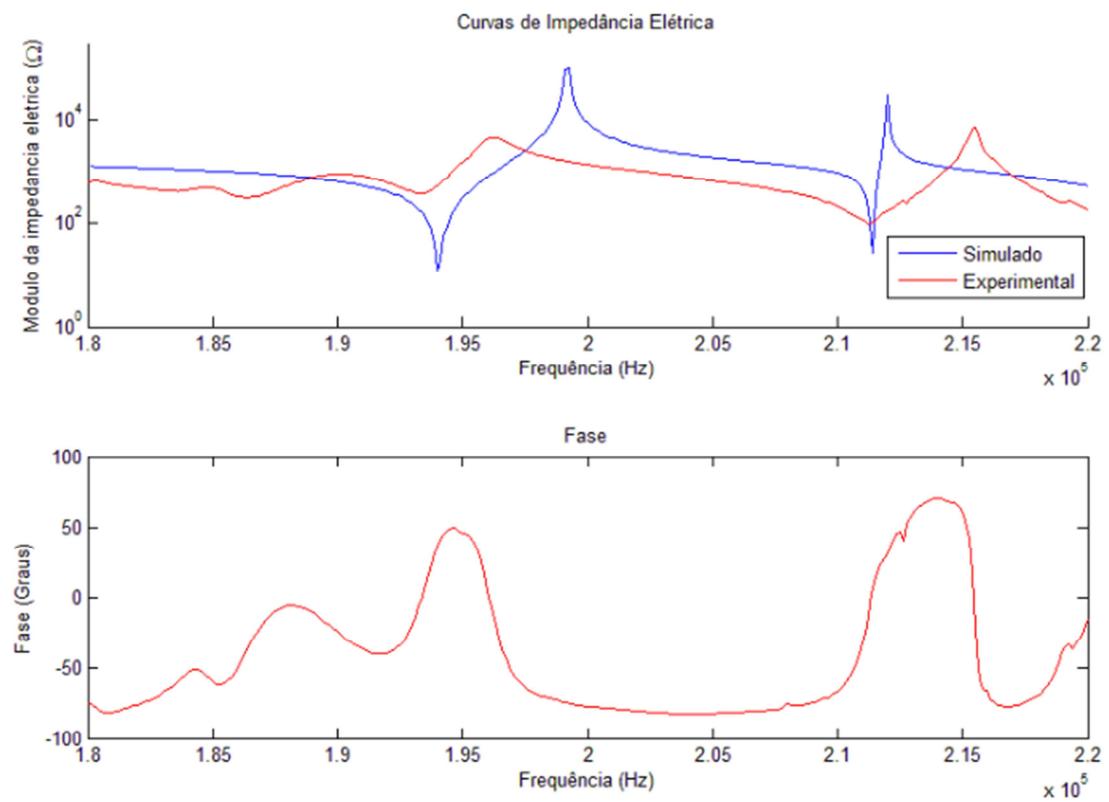


Figura 43: Comparação das curvas de impedância elétrica simulada e experimental do transdutor não otimizado.
Para o resultado experimental foi mostrada a curva de fase da impedância elétrica.

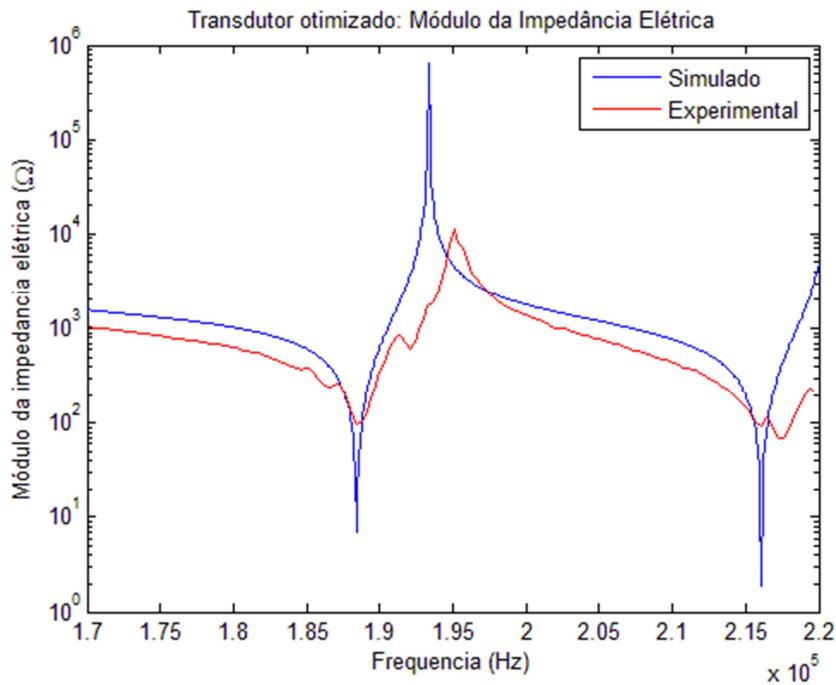


Figura 44: Comparação das curvas de impedância elétrica simulada e experimental do transdutor otimizado.

A partir dos gráficos, nota-se que as curvas de impedância elétrica para os transdutores reais e simulados se comportam de forma semelhante. Os valores da frequência de ressonância no caso do transdutor não-otimizado são de 194 kHz e 193,4 kHz para o simulado e o experimental, respectivamente, considerando o modo de vibrar desejado. No caso do transdutor otimizado as curvas de impedância se ajustaram bem no modo desejado, de modo que as frequências encontradas foram de 188,4 kHz e 188,5 kHz para o simulado e o experimental, respectivamente. A impedância elétrica obtida na ressonância foi de 368Ω para o transdutor não otimizado e 98Ω para o transdutor otimizado.

Na Fig. 43 foi mostrada a curva de fase da impedância elétrica para o transdutor experimental. Como o mínimo da curva de impedância elétrica não é tão saliente quanto a da curva teórica, devido aos modos de vibrar acoplados, deve-se encontrar a frequência de ressonância utilizando-se também a curva de fase. A frequência de ressonância é obtida no ponto em que a fase inverte de sinal e a impedância elétrica é um ponto de mínimo.

Verifica-se ainda que as curvas relativas ao modelo simulado representam um caso mais próximo do ideal pois as curvas não apresentam outros pontos de mínimos e máximos locais além das frequências de ressonância e antirressonância e ainda o modulo da impedância

elétrica na ressonância tende a um valor muito pequeno. Essas características diferem para as curvas dos modelos experimentais.

7.3 Deslocamentos da Superfície do Transdutor

Os deslocamentos da superfície foram medidos com um aparato em que também foi possível obter a diferença de fase entre a vibração do transdutor e o sinal de referência. Isto permitiu uma comparação mais precisa entre os transdutores teórico e experimental e os modelos teóricos.

Para a medição foi utilizado um interferômetro a *laser* Polytec OFV-5000, um gerador de sinais Agilent 33250A, um amplificador AR worldwide modelo 80DA3, um osciloscópio Agilent DSO5032A e uma mesa com fuso que movimenta o transdutor. O sistema montado está mostrado na Fig. 45 enquanto o diagrama de blocos com as ligações dos equipamentos está representado na Fig. 46.

Um dos canais do osciloscópio provém da saída do *laser* (canal 1) e o outro (canal 2) da saída do amplificador, para que fosse possível medir a fase entre os sinais. No osciloscópio, o sinal proveniente da saída do amplificador é representada na tela de forma estática, pois é uma senóide, enquanto o sinal vindo do *laser* aumenta ou diminui o sinal conforme os valores dos deslocamentos e muda sua fase em 180° dependendo da posição em que for feita a medida. Espera-se que a fase mude na transição entre ranhuras, como representado na Fig. 2. A mesma saída do amplificador excita os transdutores na respectiva frequência de ressonância.

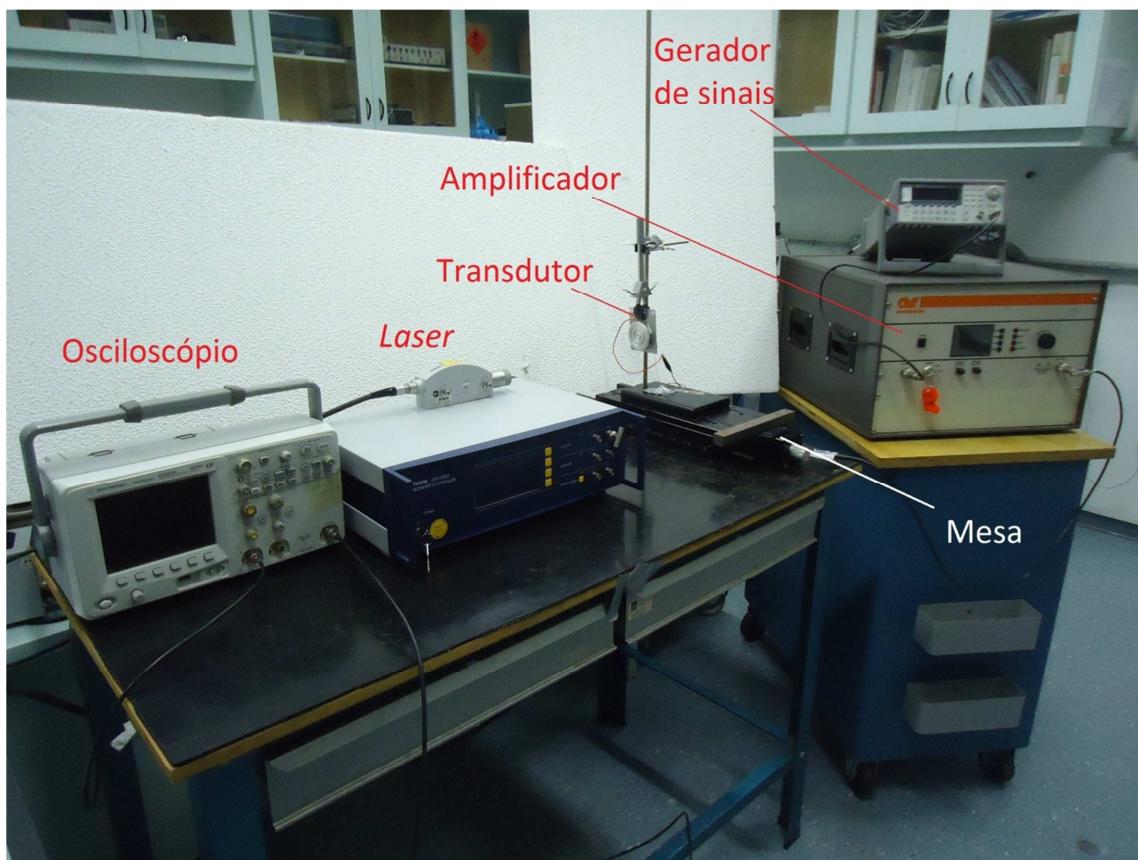


Figura 45: Montagem do sistema para medição de deslocamentos na superfície do transdutor.

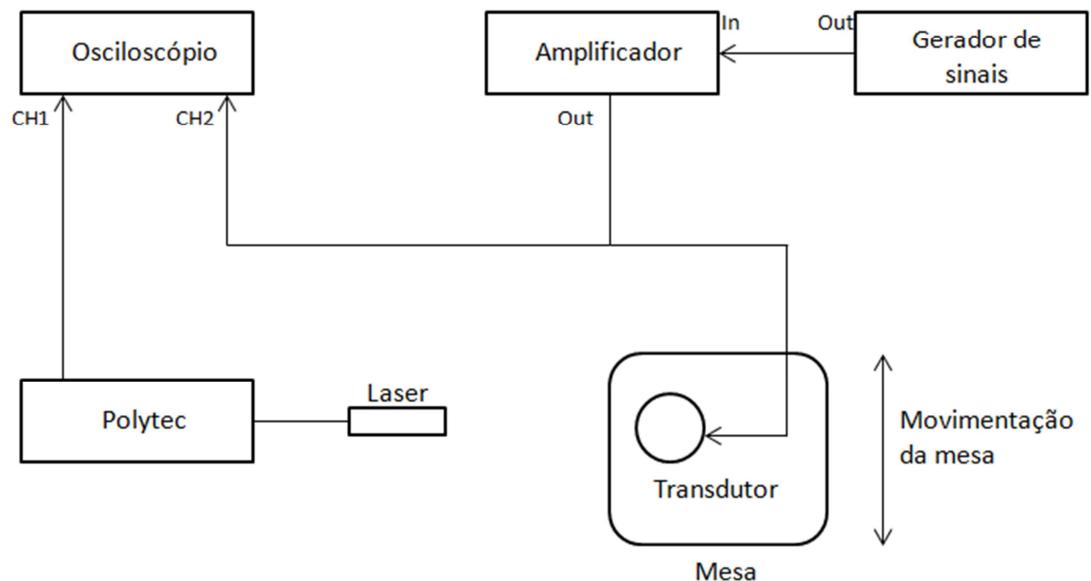


Figura 46: Diagrama de blocos com as ligações entre os equipamentos.

O gerador de sinais foi configurado para enviar um sinal harmônico de frequência 193,3kHz para o transdutor não otimizado e 188,5kHz para o transdutor otimizado, com tensão de 20 mV pico-a-pico. No amplificador foi utilizado um ganho de 10% e impedâncias de $400\ \Omega$ para o transdutor não otimizado e de $100\ \Omega$ para o transdutor otimizado a fim de casar a impedância elétrica do transdutor com o amplificador. As tensões que chegavam aos transdutores eram de 2,28V e 2,75V para o otimizado e o não otimizado, respectivamente.

Com o vibrômetro a *laser* utilizado é possível medir vibrações com frequências até 24MHz e deslocamentos da ordem de sub-nanometros. Os deslocamentos foram medidos a partir do canal de medição de velocidade do vibrômetro, pois o sinal era mais estável que a medição direta pelo canal de medida de deslocamentos e, portanto, permitia uma melhor precisão nos resultados. O *laser* deve ser calibrado ajustando sua distância à superfície do transdutor até que a barra indicativa da intensidade do sinal esteja perto do máximo. Os dados foram obtidos movendo-se o transdutor perpendicularmente à direção do feixe de luz.

A sensibilidade escolhida na medição foi de 20 mm/s/V, que permite realizar medições com frequências até 1MHz. Foram utilizados filtros passa baixa de 1,5MHz e passa alta de 100Hz, para evitar ruídos. A amplitude da tensão de saída do *laser* foi medida no osciloscópio e a partir dela calcularam-se os deslocamentos como descrito a seguir.

Sendo a sensibilidade $U_m = 20 \frac{mm}{s.V}$, V_{pp} a tensão pico-a-pico medida no osciloscópio, A_d a amplitude do deslocamento de um ponto da superfície, ω a frequência angular, f a frequência de excitação do transdutor e t o tempo, tem-se:

$$x(t) = A_d \sin(\omega t) \quad (7.1)$$

$$v(t) = A_d \omega \cos(\omega t) \quad (7.2)$$

Que são o deslocamento e velocidade em função do tempo, respectivamente, de um ponto da superfície do transdutor vibrando. Assim, é possível obter a amplitude dos deslocamentos sabendo que:

$$U_m \left(\frac{V_{pp}}{2} \right) = A_d \omega \quad (7.3)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (7.4)$$

Portanto, das eq. (7.3) e eq. (7.4):

$$A_d = U_m \left(\frac{V_{pp}}{2} \right) \left(\frac{1}{2\pi f} \right) \quad (7.5)$$

Os deslocamentos e fases foram medidos 2 vezes em 24 pontos no raio do transdutor e foram feitas médias para cada ponto. Os pontos foram obtidos a cada 1,25 mm que é a metade do passo do fuso da mesa que movimenta o transdutor. Obtendo os valores dos deslocamentos e da fase para cada transdutor construído e comparando com os deslocamentos dos modelos simulados obtém-se as Fig. 47 e Fig. 48.

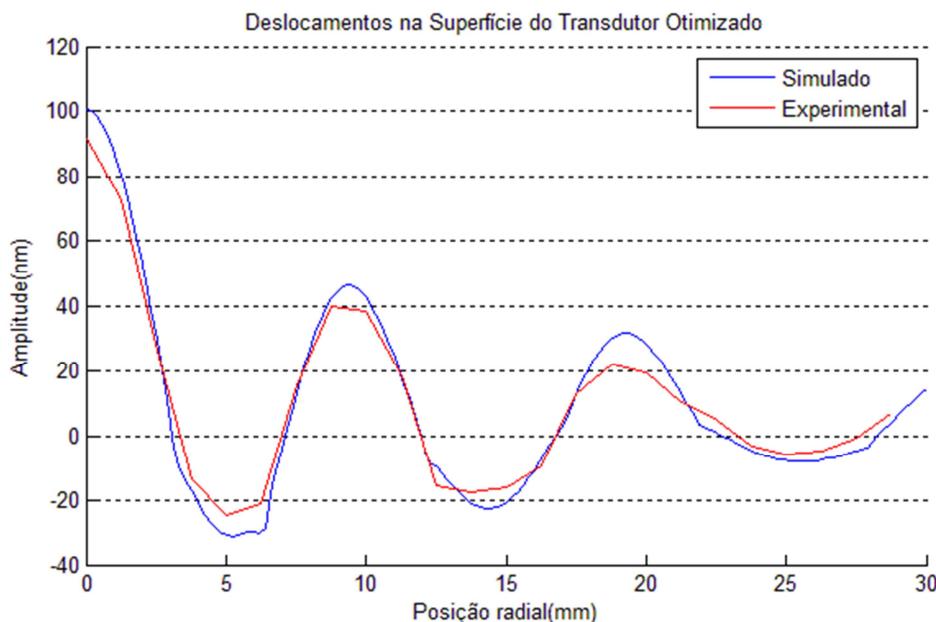


Figura 47: Comparação entre os deslocamentos nos modelos simulado e experimental do transdutor não otimizado. Para melhor visualização dos resultados, os deslocamentos simulados estão 10 vezes menores.

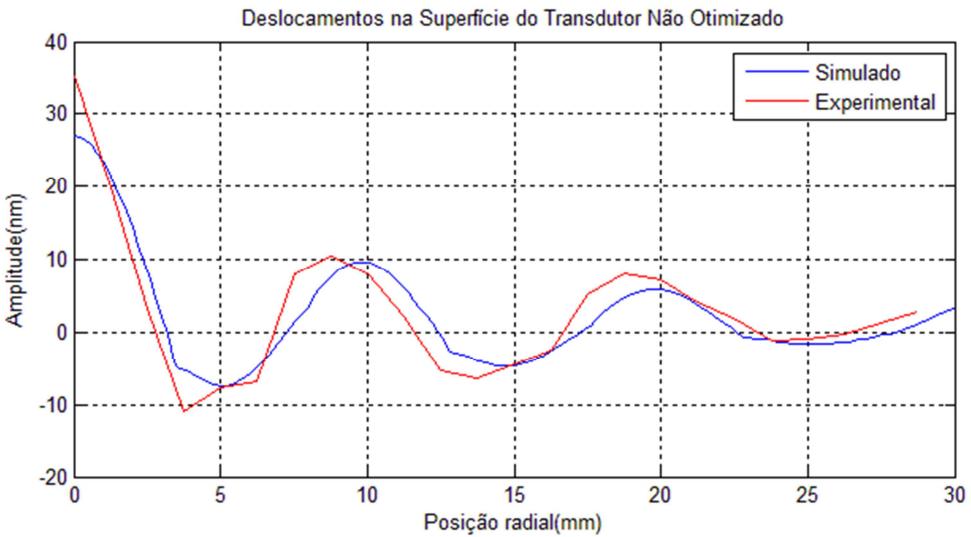


Figura 48: Comparação entre os deslocamentos nos modelos simulado e experimental do transdutor otimizado. Para melhor visualização dos resultados, os deslocamentos simulados estão 10 vezes menores.

Da comparação dos deslocamentos, verifica-se que as fases de vibração dos pontos nos transdutores construídos seguem o padrão apresentado nos modelos simulados, apresentados nas Fig. 30 e Fig. 37. As fases de vibração da superfície nas ranhuras externas são opostas às fases nas ranhuras internas, tanto no transdutor otimizado quanto no não otimizado. Caso a fase invertesse no centro das ranhuras, isto indicaria uma baixa eficiência na transmissão de energia, mesmo com grandes amplitudes de deslocamento.

Como as fases concordaram com os modelos teóricos, o que determinou qual dos dois transdutor foi mais eficiente foram as medidas dos deslocamentos da superfície. Nas Fig. 47 e Fig. 48, percebe-se que a amplitude dos deslocamentos no transdutor otimizado experimental é maior do que a amplitude dos deslocamentos no transdutor não otimizado em todo o diâmetro do transdutor.

Os resultados experimentais mostraram-se coerentes, no entanto, os deslocamentos obtidos na simulação deveriam ser menores que os obtidos nos experimentos, visto que a tensão aplicada nos transdutores foram maiores que 2 V e a tensão utilizada na simulação foi de 1V para ambos os modelos, teórico e experimental e os deslocamentos são diretamente proporcionais à tensão aplicada. Isto pode ser devido ao fato de que o amortecimento do alumínio foi estimado para simulação no MEF.

Para o transdutor não otimizado, os deslocamentos na simulação deveriam ser da ordem de 2,75 vezes menor que no experimental. O valor utilizado de amortecimento foi de 1e-11 e para encontrar o valor que forneça o resultado esperado, foram feitas simulações alterando-se os valores das constantes de amortecimento utilizando a mesma tensão que foi utilizada nos modelos experimentais. O valor encontrado para o amortecimento do alumínio foi de 1,6e-9. Com o valor corrigido os deslocamentos dos modelos experimentais ficam como representados nas Fig. 49 e Fig. 50.

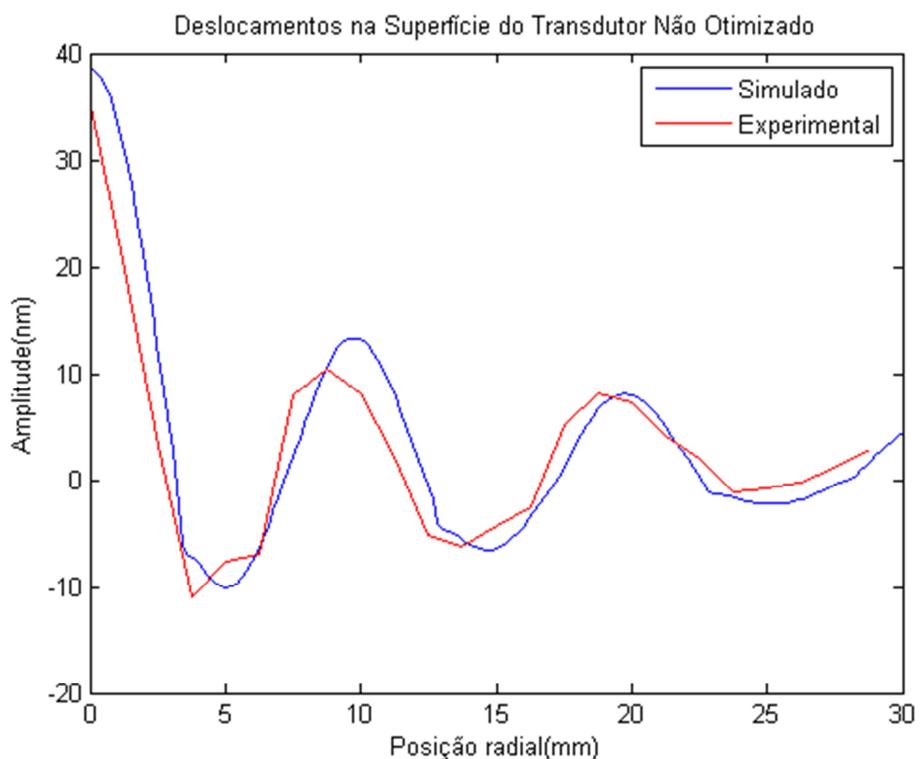


Figura 49: Comparação entre os deslocamentos da superfície do transdutor não otimizado simulado e experimental com a constante de amortecimento corrigida para 1,6e-9.

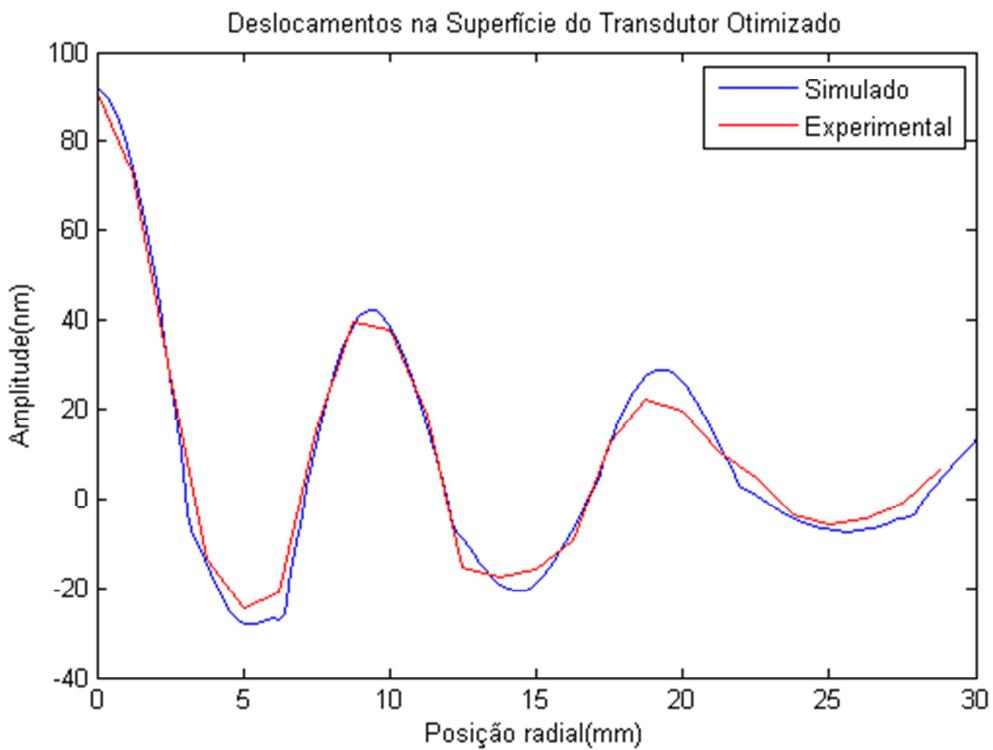


Figura 50: Comparação entre os deslocamentos da superfície do transdutor otimizado simulado e experimental com a constante de amortecimento corrigida para 1,6e-9.

Pode-se observar dos resultados anteriores que, apesar do valor da constante de amortecimento utilizada nas simulações estar incorreta, a curva de impedância elétrica se ajustou nos modelos experimental e teórico e a distribuição e fase dos deslocamentos da superfície continuo aproximadamente a mesma, como podem ser vistos nas Fig. 49 e Fig. 50. Após os ajustes das constantes, os deslocamentos teóricos continuaram proporcionais e na mesma posição dos deslocamentos experimentais.

7.4 Medição da amplitude dos sinais emitidos

A medição das amplitudes dos sinais emitidos pelos transdutores também permite compará-los para saber qual o mais eficiente na transmissão de energia para o meio. O sistema de medição é composto pelo amplificador, gerador de sinais e osciloscópio utilizados na medida dos deslocamentos, além de um pulsador/receptor Panametrics-NDT modelo 5077PR e um transdutor de ultrassom para emissão em ar de referência construído no próprio

laboratório. O transdutor de referência tem 20mm de diâmetro e capta sinais numa banda larga sendo, portanto, um bom receptor.

O experimento consiste em medir a amplitude dos sinais transmitidos pelos transdutores construídos utilizando como receptor o transdutor de referência. O transdutor de referência foi posicionado em frente ao transdutor construído e centralizado. A montagem do sistema de medição é mostrada na Fig. 51 e o diagrama de blocos com as ligações entre os equipamentos está representado na Fig. 52.

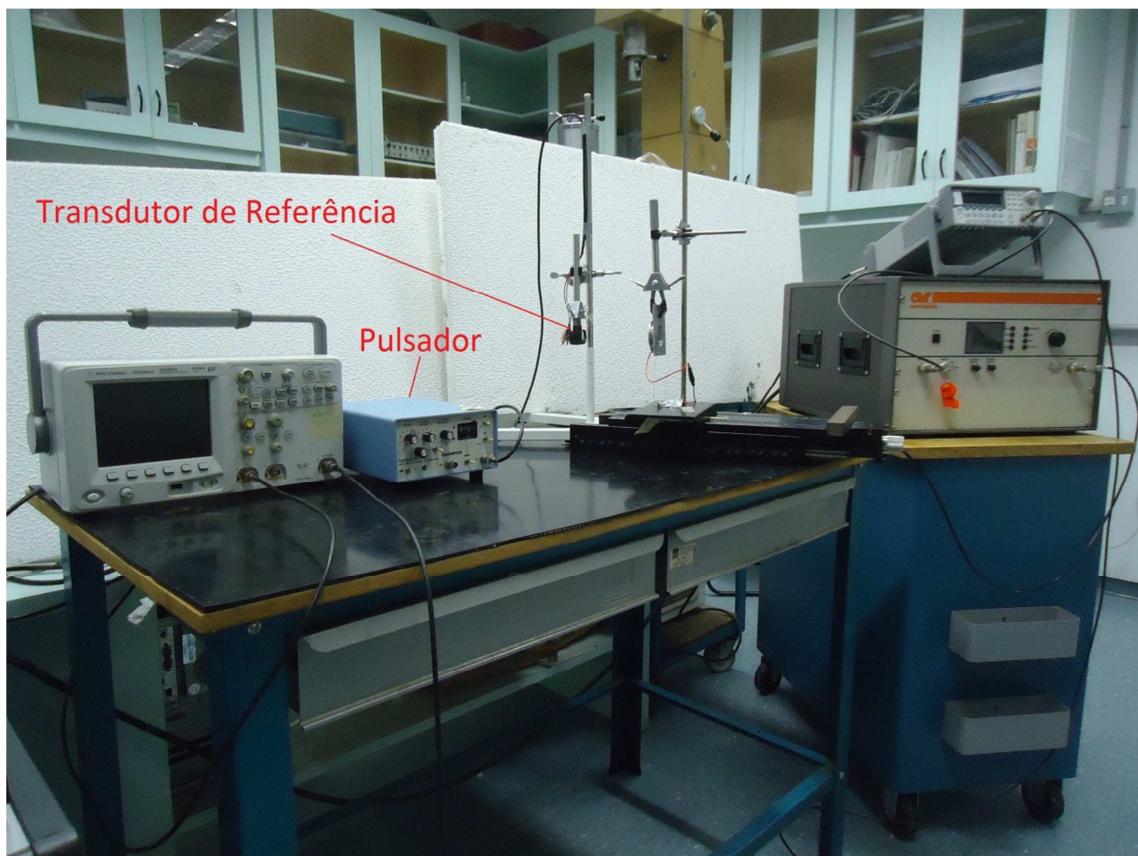


Figura 51: Montagem do sistema de medição.

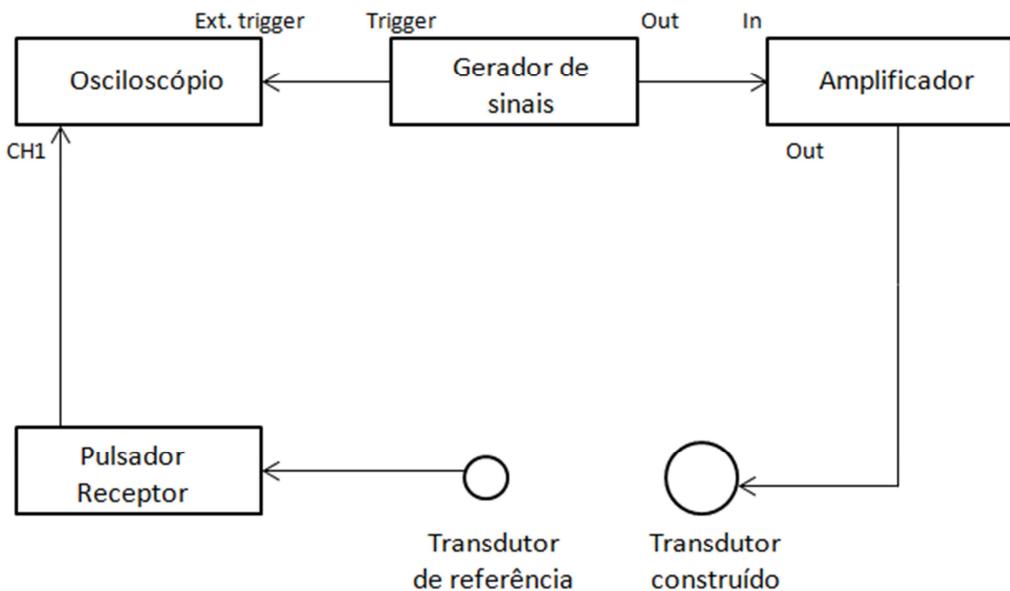


Figura 52: Diagrama de blocos com as ligações entre os equipamentos para a medição das amplitudes dos sinais.

O transdutor construído foi novamente excitado na frequência de ressonância e as configurações do amplificador e do gerador de sinais foram mantidas. No pulsador foi utilizado um ganho de 20 dB, um filtro passa baixa de 10MHz e o modo de recepção. O pulsador recebia como entrada o sinal do transdutor de referência e, o osciloscópio tinha como entrada do canal 1 a saída do pulsador.

A primeira medição feita foi de um sinal harmônico de mesma amplitude para os transdutores construídos, que foram mantidos a uma mesma distância do transdutor de referência, de aproximadamente 70 mm. A comparação entre os sinais obtidos encontram-se na Fig. 53.

Foram medidos também os sinais dos transdutores devido a uma excitação de um *burst* de 20 ciclos de senoide e período de 10ms, também na frequência de ressonância dos respectivos transdutores. Neste caso, o osciloscópio recebia um *trigger* externo vindo do gerador de sinais. Os resultados são mostrados nas Fig. 54 e Fig. 55.

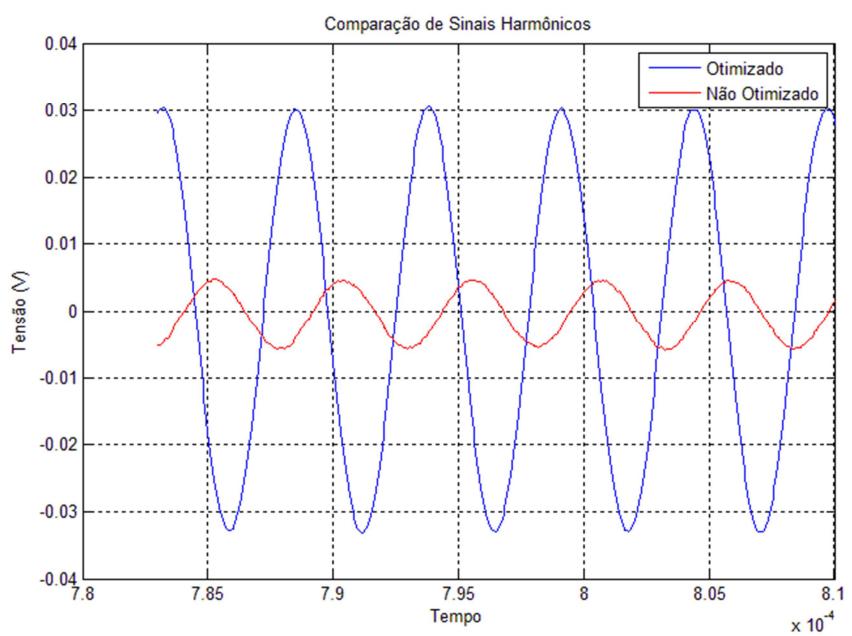


Figura 53: Comparação entre os sinais dos transdutores otimizado e não otimizado.

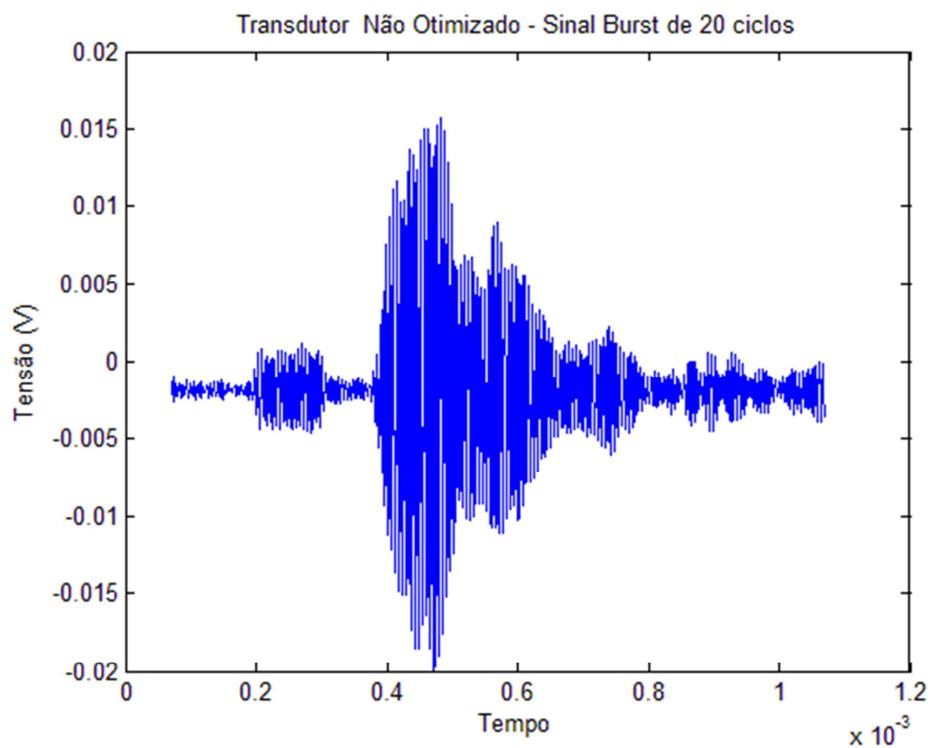


Figura 54: Sinal *burst* de 20 ciclos enviado pelo transdutor não otimizado.

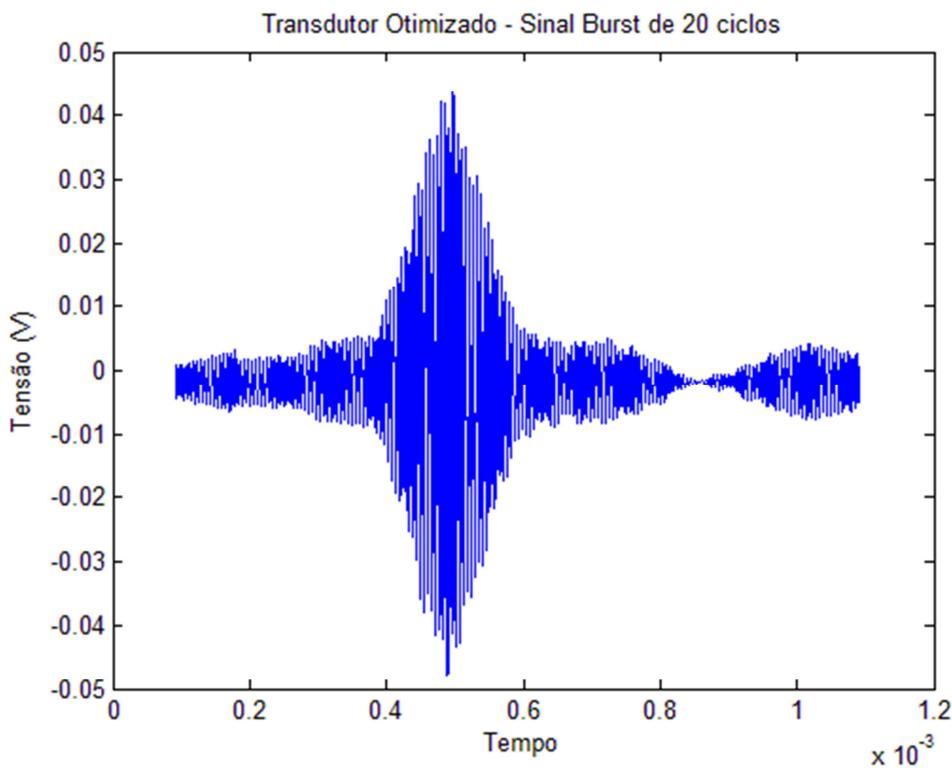


Figura 55: Sinal *burst* de 20 ciclos enviado pelo transdutor otimizado.

Na Fig. 53 os sinais representados não estão em fase, pois as medições foram feitas separadamente e os sinais tem frequências diferentes. Na Fig. 54 e Fig. 55 as medições foram feitas com a distância dos transdutores fixas, portanto os sinais foram captados no mesmo instante de tempo.

Dos três gráficos anteriores verifica-se que os sinais mais intensos captados pelo transdutor de referência foram provenientes do transdutor otimizado. Na Fig. 53 a amplitude da tensão medida do transdutor de referência foi aproximadamente 6 vezes maior para o transdutor otimizado do que para o não otimizado. Observa-se também que a amplitude do sinal na Fig. 54 é mais do que duas vezes maior que o sinal do transdutor não otimizado, mostrado na Fig. 55. Os resultados indicam que o campo acústico produzido pelo transdutor otimizado é mais intenso e, portanto é mais adequado para aplicações de ultrassom no ar.

7.5 Diretividade

Uma propriedade importante de transdutores de ultrassom é a sua diretividade. A medida da diretividade é feita calculando-se os sinais emitidos pelo transdutor fora do eixo axial ao transdutor que passa pelo seu centro. Em geral, são requeridos transdutores bem diretivos para que pouca energia seja perdida fora da região de trabalho, que normalmente é axial ao transdutor passando pelo seu centro.

A medição foi feita utilizando os mesmos equipamentos mostrados na Fig. 51, na medida das amplitudes dos sinais enviados, no entanto, variaram-se tanto as distâncias axiais quanto radiais ao transdutor. A Fig. 56 indica como foram feitas as medições. As medidas foram tiradas a cada 200 mm na direção axial e a cada 25 mm na direção transversal ao transdutor construído.

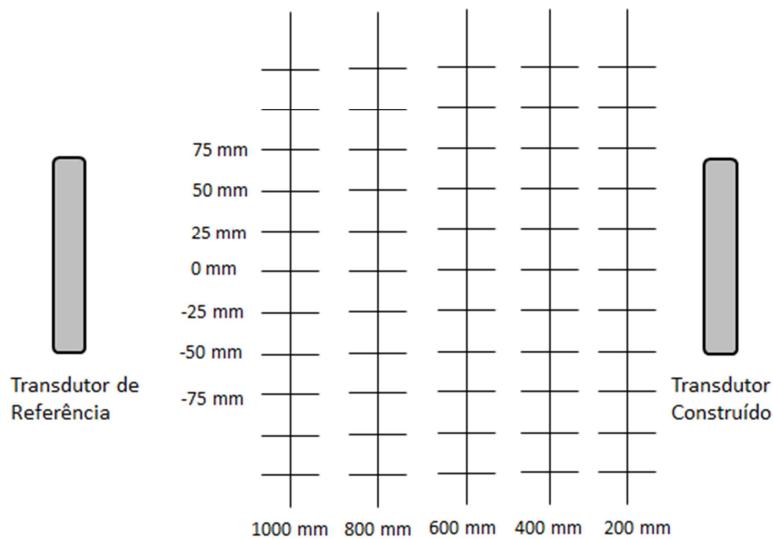


Figura 56: Esquema da medição da diretividade.

Os gráficos das Fig. 57 e Fig. 58 mostram os resultados obtidos para os transdutores não otimizado e otimizado, respectivamente. Novamente, os transdutores foram excitados na frequência de ressonância, com o gerador de funções enviando 20 mV pico-a-pico, o amplificador impunha um ganho de 10% ao sinal e uma impedância

no circuito de $400\ \Omega$ e $100\ \Omega$ para os transdutores não otimizado e otimizado. O pulsador atuou no modo de recepção com ganho de 40 dB.

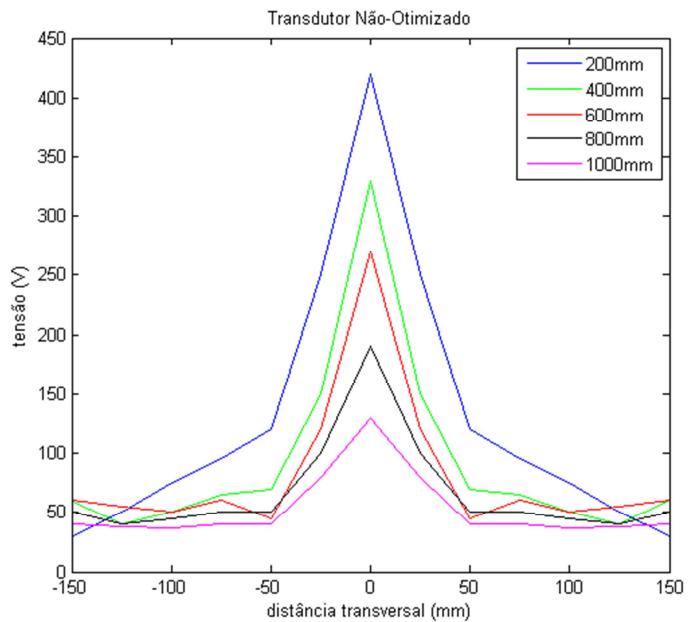


Figura 57: Sinais observados para o transdutor não otimizado.

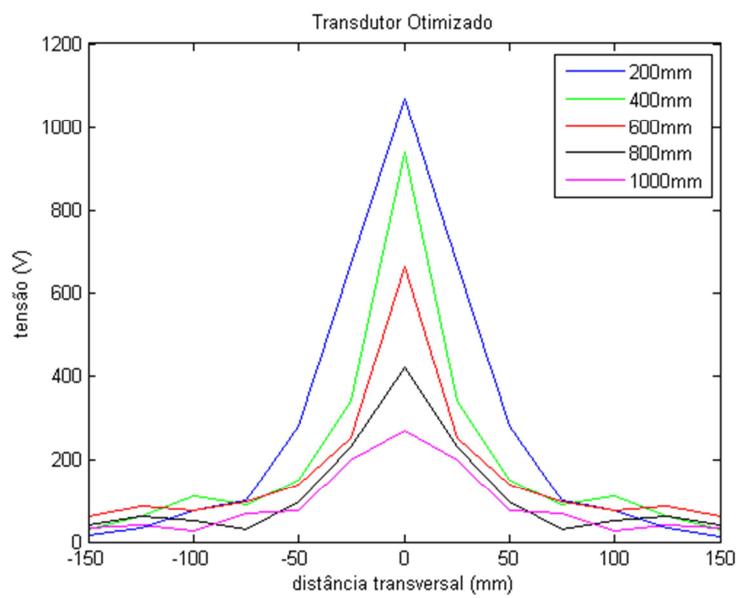


Figura 58: Sinais observados para o transdutor otimizado.

A partir dos gráficos, verificou-se que, para ambos os transdutores, a maior intensidade dos sinais encontram-se entre as distâncias transversais de -50 e 50 mm, para qualquer distância axial. Como diâmetro dos transdutores é de 60mm, eles podem ser considerados bem diretivos, visto que, em geral, esperava-se que a amplitude dos sinais ficasse mais distribuída transversalmente ao se aumentar a distância axial. Novamente, por estas medições, verificou-se que a amplitude dos sinais emitidos pelo transdutor otimizado foram maiores do que o transdutor não otimizado.

8 CONCLUSÃO

As primeiras decisões a serem tomadas no projeto foram definir os materiais a serem utilizados e a forma de fixação dos transdutores. Durante os testes, o alumínio mostrou-se a melhor alternativa para o material que comporia o disco emissor, pois fornecia maiores amplitudes de vibração da superfície. A caracterização da cerâmica, apesar de complicada na teoria e demorada na execução do programa, foi realizada com resultados satisfatórios dos valores das constantes piezelétricas.

Foram construídos dois protótipos de transdutores, sendo um inicial, com ajuste manual das ranhuras (analisando o modelo pelo MEF de um disco plano vibrando), e um otimizado, em que o ajuste das ranhuras foi feito através de um algoritmo de otimização. As maiores dificuldades para o desenvolvimento de um bom programa que realizasse a otimização foram a questão do tempo de simulação, o problema de encontrar o modo de vibrar desejado e a definição da função objetivo.

Os primeiros programas criados demoravam aproximadamente 4 minutos para executar uma iteração, mas após os ajustes feitos cada iteração passou a ser feita em menos de 1 minuto. Para encontrar o modo de vibrar do transdutor no programa, não foi utilizada a curva de impedância elétrica, mas a amplitude do deslocamento do ponto central da superfície emissora. Desse modo, tem-se maior segurança de que o modo obtido é um modo de flexão, pois este é o modo que possui maiores amplitudes de deslocamentos na direção de emissão. A função objetivo foi implementada com pesos nos valores dos deslocamentos da superfície de cada ranhura, pelo fato de que a região central do disco vibra com maior amplitude. Sem os pesos, a otimização era realizada levando em consideração somente esta região.

A parte experimental mostrou que a otimização levou a uma configuração de transdutor consideravelmente melhor que o transdutor não otimizado. Os deslocamentos máximos do transdutor otimizado foram mais do que 2 vezes maiores que os deslocamentos do transdutor não otimizado. Além disso, a amplitude dos sinais recebidos pelo transdutor de referência também foi maior, tanto na excitação harmônica, quanto na excitação por *burst*.

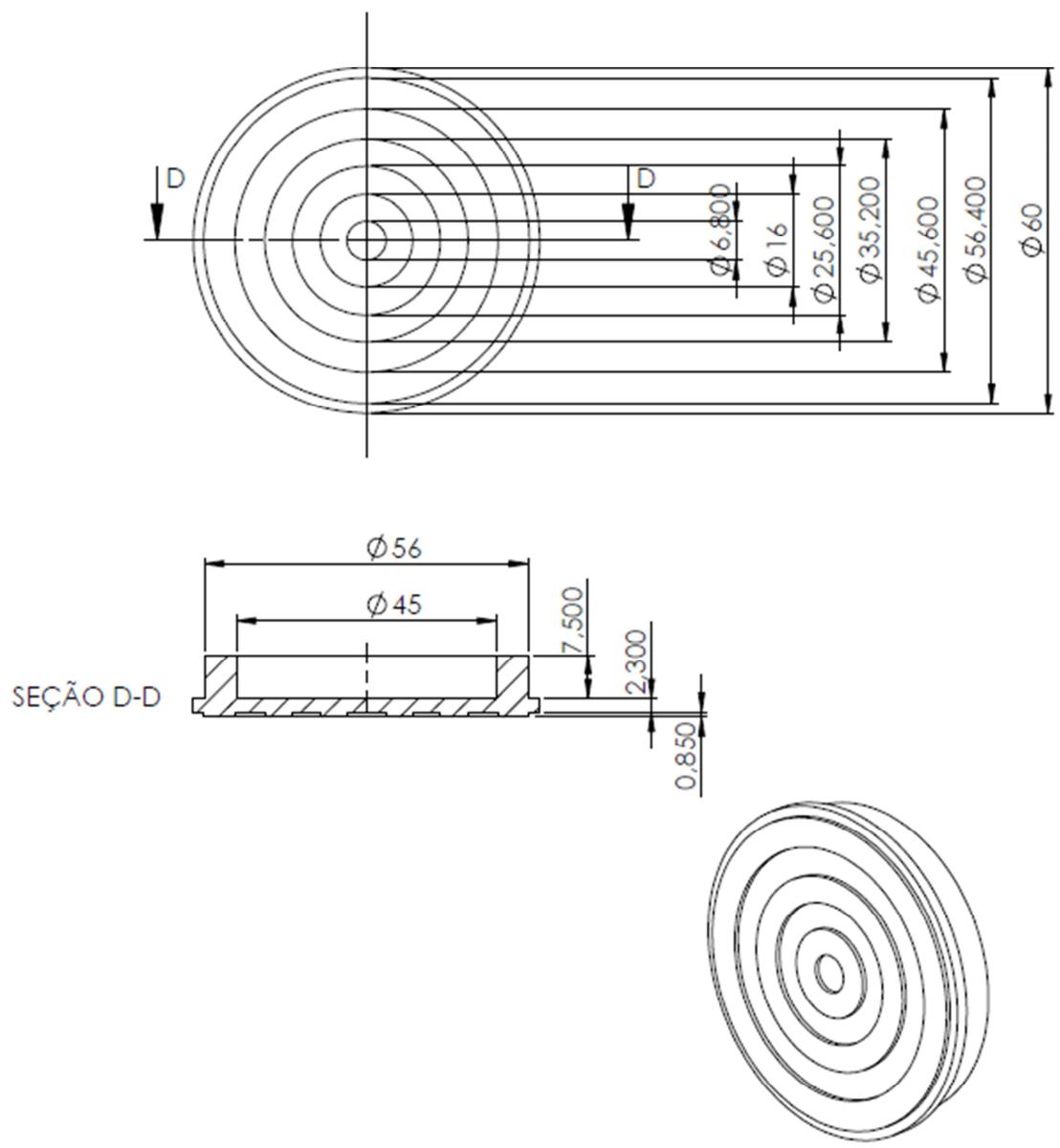
A comparação entre os resultados teóricos e experimentais teve uma alta diferença nos valores de deslocamentos para ambos os transdutores, devido ao valor de amortecimento utilizado no MEF. No entanto, foi verificado que o valor de amortecimento influencia nos deslocamentos de forma aproximadamente linear, de modo que após a correção dos valores, a amplitude dos deslocamentos e fase concordaram com os resultados experimentais. Além disso, o amortecimento não influenciou na curva de impedância elétrica, pois em ambos os transdutores os valores de frequência de ressonância dos protótipos construídos foram muito próximos dos valores teóricos.

9 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Auld, B. A., “*Acoustic fields and waves in solids*”, vol. 1, John Wiley & Sons, 1973.
- Arnau, A., “*Piezoelectric Transducers and Applications*” – 2^a edição, Springer, 2008.
- Buiochi, F., “Relatório de Atividades”, Escola Politécnica da Usp – Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, 2008.
- Cheeke, J.D.N., “*Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*”, CRC Press LLC, 2002.
- Esminger, D., Stulen, F.B., “*Ultrasonics – Data, Equations and their Practical Uses*”, CRC Press, 2009.
- Haftka, R.T., Gürdal, Z., “*Elements of Structural Optimization*”, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- IEEE - “*An American National Standard IEEE Standard on Piezoelectricity*” -, ANSI/IEEE 176, 1987.
- Juarez, J.A.G., Rodriguez, G., Acosta, V., Riera, E., “*Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing*”, Elsevier- *Ultrasonics Sonochemistry*, p.953-964, 2010.
- Juarez, J.A.G., Corral, G.R., Sarabia, E.R.F. de, Martinez, F.V., Pozuelo, C.C., Aparicio, V.M.A. “*Recent Developments in Vibrating-Plate Macrosonic Transducers*”, *Ultrasonics* 40, p.889–893, 2002.
- Juarez, J.A.G., “*New Technologies in High-Power Ultrasonic Industrial Applications*”, *Ultrasonics Symposium*, p.1343-1352, 1994.
- Juarez, J.A.G., Corral, G.R., Garreton, L.G., “*An ultrasonic transducer for high power applications in gases*”, IPC Business Press, November, p.267-271, 1978.
- Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V., “*Fundamentals of Acoustic*”, 4^a edição, John Wiley & Sons, Inc, 1982.
- Khmelev, V. N., Lebedev, A.N., Tsyganok, S.N., Shalunov, A.V., Galahov, A.N., Shalunova, K.V., “*Multifrequency Ultrasonic Transducer with Stepped-Plate Disk*”, **10º International Conference and Seminar EDM'2009**, Section IV, p.250-253, 2009.
- Kuttruff, H., “*Ultrasonics, Fundamentals and Applications*”, Elsevier Applied Science Publishers ltd., 1991.

- Logan, D.L, “*A First Course in the Finite Element Method*”-4^a Edição, Thomsom, 2007.
- Mason, T.J., “*Sonochemistry and the environment – Providing a “green” link between chemistry, physics and engineering*”, Elsevier, p.476-483, 2007.
- Moon, W.K., Lee, H., Je, Y., “*Sound Generator for use in Parametric Array*”, United States Patent Application Publication, Pub. No.: US 2010/0020990 A1, (22/07/2009).
- Mulet, A., Cárcel, J. A., Sanjuán, N., Bon, J., “*New Food Drying Technologies – Use of Ultrasound*”, Sage Publications, p. 215-221, 2003.
- Naillon. M., Coursant. R.H., Besnier. F., "Analysis of Piezoelectric Structures by a Finite Element Method", ACTA Electronica, v. 25, n.4, pg. 341-362, 1983.
- Ostergaard D.F., Pawlak, T. P., “*Three-Dimensional Finite Elements for Analizing Piezoelectric Structures*”, Ultrasonic Symposium, 1986.
- Pérez, N., Andrade, M.A.B., Buiochi, F., Adamowski, J.C., “*Identification of Elastic, Dielectric, and Piezoelectric Constants in Piezoceramic Disks*”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 57, no. 12, December, p.2772-2783, 2010.
- Portal GEF-UFSM. Disponível em <<http://www.ufsm.br/gef/aniondaslong.htm>>. Acessado em 21/04/12 às 17:47:20.
- Renner, G., Ekárt, A., “*Genetic algorithms in computer aided design*”, Elsevier Science Ltd., p.709-726, 2003.
- Segelind, L.J, “*Applied finite element analysis*” – 2^a edição, John Wiley & Sons, 1984.
- Stern, J.M., Pereira, C.A. de B., Ribeiro, C. de O., Dunder, C., Nakano, F., Lauretto, M., “Otimização e Processos Estocásticos Aplicados à Economia e Finanças”, 30 de maio de 2006.
- Wales, D.J., Doye, J.P.K, “*Global Optimization by Basin-Hopping and the Lowest Energy structures of Lennard-Jones Clusters Containing up to 110 Atoms*”, J. Phys. Chem. A-110, p.5111-5116, 1997.
- Zienkiewicz, O. C., Cheung, Y. K., “*The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics- Numerical solution of problems in structural and continuum mechanics*”, McGraw-Hill, 1967.

ANEXO A



ANEXO B

