

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

PAULO DAMBROS MENIN

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTOR DE MODO SH_0 , OMNIDIRECIONAL
UTILIZANDO ARRANJO DE CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS**

Porto Alegre

2017

PAULO DAMBROS MENIN

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTOR DE MODO SH_0 OMNIDIRECIONAL
UTILIZANDO ARRANJO DE CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke

Porto Alegre

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-diretor: Carla Schwengber ten Caten

Programa de pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGE3M

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador substituto: Prof. Dr. Afonso Reguly

Menin, Paulo Dambros

Desenvolvimento de Transdutor de Modo SH_0 Omnidirecional utilizando arranjo de Cerâmicas Piezoelétricas / Paulo Dambros Menin. – 2017.

93 f.:il.

Orientador: Thomas Gabriel Rosauo Clarke.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Monitoramento Estrutural. 2. Ondas Guiadas. 3. SH_0 Omnidirecional. 4. Transdutores. I. Clarke, Thomas Gabriel Rosauo, orient.

PAULO DAMBROS MENIN

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTOR DE MODO SH_0 OMNIDIRECIONAL
UTILIZANDO ARRANJO DE CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

BANCA EXAMINADORA

Dr. Fernando Dotta – EMBRAER S.A. – São José dos Campos, Brasil

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz – UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Dr. Ricardo Callegari Jacques – UFRGS – Porto Alegre, Brasil

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao orientador deste trabalho Professor Thomas Clarke, pelos ensinamentos, conselhos e suporte prestados durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e aos professores do programa de pós-graduação PPGE3M pelo ensino público e de qualidade.

Ao Laboratório de Metalurgia Física - LAMEF por oportunizar o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do LAMEF e grupo GEND, pelo companheirismo diário, amizade e auxílio nas mais diversas atividades. Agradeço em especial ao Henrique, que muito me ajudou no início do trabalho com o processamento dos sinais, e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta pesquisa.

Por fim agradeço à minha família, meus pais e meus irmãos, por todo o apoio e compreensão durante esta etapa de minha vida.

RESUMO

A utilização de ondas guiadas em técnicas de monitoramento de integridade estrutural tem se mostrado uma alternativa interessante para economia de tempo e de custos de operação. Técnicas com ondas guiadas apresentam a característica de monitorar trechos extensos de uma estrutura a partir de um único ponto de acesso, permitindo a inspeção de partes remotas e de difícil acesso. Entre os modos fundamentais de propagação de ondas guiadas em chapas, o modo SH_0 possui a vantagem de não ser dispersivo, além de sofrer menores atenuações ao se propagar em superfícies em contato com fluidos. Neste trabalho é proposto um modelo de transdutor do modo SH_0 de forma omnidirecional em uma chapa de aço utilizando um arranjo com cerâmicas piezoelétricas, que permita inspecionar determinada área de um componente através de um único modo de propagação. Para caracterizar e compreender o comportamento da resposta obtida foram realizadas simulações numéricas parametrizando características do modelo proposto, como o número de elementos piezoelétricos e dimensões geométricas dos componentes do transdutor. Para validação dos resultados do modelo numérico foram construídos modelos experimentais do transdutor, os quais foram instalados sobre uma chapa de aço de 2mm de espessura para verificação dos modos de propagação emitidos. Avaliando a relação entre intensidades de cada modo emitido e a qualidade da emissão de SH_0 foi possível identificar as frequências que apresentaram resposta com a característica desejada. Também foi verificado o comportamento dos transdutores construídos ao serem excitados por ondas propagando na chapa, avaliando a sua utilização também como receptores.

Palavras-chave: Monitoramento Estrutural, Ondas Guiadas, SH_0 Omnidirecional, Transdutores.

ABSTRACT

The use of guided waves in structural health monitoring techniques has already proved to be an interesting alternative to reduce inspection time and overall operational costs. Guided waves techniques enable monitoring large structures from one single access point, allowing the inspection of distant and hard access parts. Among the fundamental propagation modes of guided waves in plates, the SH_0 mode has the advantage of being non dispersive, as well as being subject to less attenuation when propagating through surfaces in contact with fluids. In this work, it is proposed one omnidirectional SH_0 mode transducer in a steel plate using a piezoelectric ceramic array, which allows inspecting a component area through a single propagation mode. Numeric simulations parameterizing features of the transducer, such as the number of piezoelectric elements and the geometric dimensions of the transducer's components, were developed to characterize and investigate the effect on the output response. To validate the numeric simulation results, experimental models of the transducer were built, which were installed on a 2mm thick steel plate to verify the generated propagation modes. The analysis of the relation between the intensity of each mode generated in the plate and the emission quality of the SH_0 mode allowed the identification of frequencies that presented the most desirable response characteristics. The behavior of the built transducers was also studied when they were excited by waves propagating through the plate, evaluating the use of the transducers as signal receptors.

Keywords: Structural Monitoring, Guided Waves, SH_0 Omnidirectional, Transducers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vazamento em Tubulação devido à presença de corrosão.....	18
Figura 2 – Monitoramento de duto por sensor instalado permanentemente.....	20
Figura 3 – Reflexão de uma onda transversal em uma superfície livre.....	21
Figura 4 – Formato dos Modos de Propagação. (a) Modo S. (b) Modo A. (c) Modo SH.....	23
Figura 5 – Curvas de dispersão para Chapa de aço com espessura de 2mm.....	23
Figura 6 – Deslocamentos dos Modos Fundamentais ao longo da espessura da chapa	24
Figura 7 - Conceitos de arranjos de cerâmicas piezoelétricas testados por Belanger e Boivin	25
Figura 8 – Modelo experimental do transdutor proposto por Belanger e Boivin.....	26
Figura 9 - Modelo experimental do transdutor proposto por Miao et al	27
Figura 10 - Modelo experimental do transdutor magnetostrictivo proposto por Seung, Kim e Kim	28
Figura 11 – Modelo experimental do EMAT proposto por Seung, Park e Kim	29
Figura 12 - Estrutura do $Pb(Zr,Ti)O_3$ acima e abaixo (polarizado) da temperatura de Curie ..	30
Figura 13 – Eixo de coordenadas considerado para a construção das relações constitutivas ..	31
Figura 14 – Configuração do Transdutor (a) Sem a presença da massa metálica (b) Com a presença da massa metálica	34
Figura 15 – (a) Cerâmica não-deformada (b) Cerâmica deformada.....	35
Figura 16 – Parâmetros Geométricos	36
Figura 17 – Modelo de Elementos Finitos	38
Figura 18 – Pontos de Aquisição ao longo de direções radiais espaçadas por 5°	40
Figura 19 – Procedimento para geração de resultados	41
Figura 20 – Configuração do transdutor Modelo 1	43
Figura 21 – Etapas de soldagem das cerâmicas no laminado de fibra de vidro. (a) Posicionamento das cerâmicas (b) Fixação do conjunto (c) Soldagem em temperatura controlada	43
Figura 22 – Etapas de soldagem posteriores. (a) Soldagem das tiras de Pyralux® (b) Soldagem do conector central do cabo coaxial (c) Isolamento do contato central para soldagem da malha externa.....	44
Figura 23 – Transdutor Modelo 1 instalado	44
Figura 24 – Transdutor Modelo 2 instalado	45
Figura 25 – Configuração da bancada	46

Figura 26 – Equipamentos utilizados. (a) Sistema de geração e aquisição de sinais (b) Fonte amplificadora (c) Módulos de controle dos vibrômetros.....	47
Figura 27 – Diagrama de configuração do procedimento experimental	47
Figura 28 – Configuração dos pontos medidos	48
Figura 29 – Sistema piezoelétrico utilizado no teste de recepção do transdutor.....	49
Figura 30 – Característica da resposta angular do sistema piezoelétrico	49
Figura 31 – Configuração do ensaio de amplitude de recepção do transdutor.....	50
Figura 32 – Magnitude dos deslocamentos (a) 90kHz (b) 140kHz.....	52
Figura 33 – Números de onda 90kHz (a) Tangenciais no plano (b) Fora do plano (c) Curvas de dispersão para chapa de aço com espessura 2mm	53
Figura 34 - Números de onda 140kHz (a) Tangenciais no plano (b) Fora do plano (c) Curvas de dispersão para chapa de aço com espessura 2mm	54
Figura 35 – Direcionalidade dos modos SH_0 e A_0 (a) 90kHz (b) 140kHz	55
Figura 36 – Comparação entre número de cerâmicas.....	56
Figura 37 – Relação SH_0/A_0 para 4, 8 e 12 cerâmicas piezoelétricas	57
Figura 38 – Amplitudes para cerâmica piezoelétrica 3mm	58
Figura 39 - Amplitudes para cerâmica piezoelétrica 13mm.....	58
Figura 40 - Amplitudes para cerâmica piezoelétrica 23mm.....	59
Figura 41 – Relação SH_0/A_0 para cerâmica piezoelétrica de 3mm	59
Figura 42 – Relação SH_0/A_0 para cerâmica piezoelétrica de 13mm	60
Figura 43 – Relação SH_0/A_0 para cerâmica piezoelétrica de 23mm	60
Figura 44 – Situações A, B e C quando a relação D_N/λ se iguala a 1.....	62
Figura 45 – Modo SH_0 em função das relações de D_N/λ para cerâmica de 3mm.....	62
Figura 46 – Modo SH_0 em função das relações de D_N/λ para cerâmica de 13mm.....	63
Figura 47 – Modo SH_0 em função das relações de D_N/λ para cerâmica de 23mm.....	63
Figura 48 – Relação de distorção do modo SH_0 utilizando cerâmica piezoelétrica de 3mm ...	65
Figura 49 – Relação de distorção do modo SH_0 utilizando cerâmica piezoelétrica de 13mm .	65
Figura 50 – Relação de distorção do modo SH_0 utilizando cerâmica piezoelétrica de 23mm .	66
Figura 51 – Amplitudes com a adição de massa metálica.....	67
Figura 52 – Relação SH_0/A_0 com a adição de massa metálica.....	68
Figura 53 - Relação de distorção do modo SH_0 com a adição de massa metálica	68
Figura 54 – Relação $f \times k$ transdutor Modelo 1 – Modos SH_0 , S_0 e A_0	70
Figura 55 – Relação $f \times k$ transdutor Modelo 1 – Modos S_0 e A_0	70
Figura 56 – Sinais obtidos para caracterização dos modos de propagação a 80kHz.....	71

Figura 57 – Modelo 1: Direcionalidade dos modos SH_0 , A_0 e S_0 (a) 40kHz (b) 80 kHz	72
Figura 58 – Modelo 1: Amplitude dos modos SH_0 , A_0 e S_0 medidos	73
Figura 59 – Modelo 1: Relação entre os modos SH_0/A_0 e SH_0/S_0	74
Figura 60 – Modelo 2: Amplitude dos modos SH_0 , A_0 e S_0 medidos	74
Figura 61 – Modelo 2: Relação entre os modos SH_0/A_0 e SH_0/S_0	75
Figura 62 – Modelo 2: Direcionalidade do Modo SH_0 na recepção (a) 20kHz (b)80kHz	76
Figura 63 – Recepção do transdutor Modelo 2 orientado a 40° - 30kHz. (a) Sinal obtido com o conjunto de vibrômetros (b) Sinal adquirido pelo transdutor Modelo2	77
Figura 64 – Amplitudes do Modo SH_0 na recepção em função da frequência.....	77
Figura 65 – Relação de distorção do modo SH_0 obtido na emissão dos transdutores.....	78
Figura 66 – Relação de distorção do modo SH_0 obtido na recepção dos transdutores	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros mantidos constantes durante todas as análises.....	36
Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos estudos por elementos finitos	37
Tabela 3 – Dimensões de chapa para os modelos de elementos finitos	39
Tabela 4 – Parâmetros utilizados na construção do transdutor Modelo 1	42
Tabela 5 – Parâmetros utilizados na construção do transdutor Modelo 2	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

END	Ensaaios não destrutivos
SH ₀	Modo <i>Shear Horizontal</i> 0
S ₀	Modo Simétrico 0
A ₀	Modo Antissimétrico 0
Ondas P	Ondas Primárias
Ondas S	Ondas Secundárias
EMAT	Transdutor acústico eletromagnético
PZT	Zirconato-titanato de chumbo
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno

LISTA DE SÍMBOLOS

c_1	Velocidade de propagação ondas P
c_2	Velocidade de propagação ondas S
λ_L	Primeira constante de Lamé
μ_L	Segunda constante de Lamé
ρ	Massa específica
θ_i	Ângulo de incidência
θ_{rl}	Ângulo de reflexão da onda longitudinal
θ_{rt}	Ângulo de reflexão da onda transversal
b	Espessura da placa
k	Número de onda na direção de propagação da onda guiada
k_{ll}	Componente do número de onda relativo à onda longitudinal
k_{ts}	Componente do número de onda relativo à onda transversal
ω	Frequência angular
n	Número da ordem do modo de propagação da onda guiada
c_p	Velocidade de fase do modo de propagação
c_g	Velocidade de grupo do modo de propagação
λ	Comprimento de Onda
$\{T\}$	Vetor de tensões
$\{D\}$	Vetor de deslocamentos elétricos
$\{S\}$	Vetor de deformações
$\{E\}$	Vetor de campo elétrico
$[e]$	Matriz de constantes piezoelétricas – tensão mecânica/campo elétrico

$[d]$	Matriz de constantes piezoelétricas – deformação mecânica/campo elétrico
$[\varepsilon^S]$	Matriz de constantes dielétricas com deformações constantes
$[\varepsilon^T]$	Matriz de constantes dielétricas com tensões constantes
$[C^E]$	Matriz de rigidez com campo elétrico constante
$[s^E]$	Matriz de flexibilidade com campo elétrico constante
d_i	Diâmetro interno do transdutor
H	Espessura da cerâmica piezoelétrica
W	Largura da cerâmica piezoelétrica
L	Comprimento da cerâmica piezoelétrica
E_b	Espessura da base metálica
E_s	Espessura da massa metálica superior
N	Número de cerâmicas piezoelétricas
x	Deslocamentos de um sistema em movimento
t	Tempo
F_0	Amplitude da força de excitação de um sistema
$[M]$	Matriz de massas de um sistema dinâmico
$[\hat{C}]$	Matriz de amortecimento de um sistema dinâmico
$[\hat{K}]$	Matriz de rigidez de um sistema dinâmico
D_N	Diâmetro considerado para normalização pelo comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Avaliação de Integridade Estrutural	18
2.2	Ondas Guiadas	20
2.3	Conceitos de Transdutores do modo SH_0 Omnidirecional	25
2.3.1	Utilização de cerâmicas piezoelétricas	25
2.3.2	Utilização de material magnetostrictivo	27
2.3.3	Utilização de EMATs	28
2.4	Piezoelasticidade	29
2.4.1	Estrutura atômica de materiais piezoelétricos	30
2.4.2	Propriedades Constitutivas	31
2.4.3	Características dos transdutores piezoelétricos	33
3	METODOLOGIA	34
3.1	Configuração do Transdutor	34
3.2	Simulação por Elementos Finitos	37
3.3	Ensaio Experimental	42
3.3.1	Modelo 1	42
3.3.2	Modelo 2	44
3.3.3	Configurações do ensaio	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Simulações por Elementos Finitos	51
4.1.1	Efeito do número de cerâmicas piezoelétricas	56
4.1.2	Efeito do comprimento das cerâmicas piezoelétricas e da base metálica	57
4.1.3	Efeito da adição de uma massa metálica na parte superior do transdutor	66
4.2	Resultados Experimentais	69

4.2.1	Avaliação dos modos de propagação emitidos	69
4.2.2	Avaliação da intensidade de emissão	71
4.2.3	Avaliação da intensidade da recepção	75
4.2.4	Avaliação da distorção na distribuição omnidirecional	78
5	CONCLUSÕES	80
6	TRABALHOS FUTUROS	81
	REFERÊNCIAS	82
	APENDICE A – GRÁFICOS DE DIRECIONALIDADE PARA EMISSÃO DO TRANSDUTOR MODELO 1	85
	APENDICE B – GRÁFICOS DE DIRECIONALIDADE PARA EMISSÃO DO TRANSDUTOR MODELO 2	87
	APENDICE C – GRÁFICOS DE DIRECIONALIDADE PARA RECEPÇÃO DO TRANSDUTOR MODELO 1	89
	APENDICE D – GRÁFICOS DE DIRECIONALIDADE PARA RECEPÇÃO DO TRANSDUTOR MODELO 2	91

1 INTRODUÇÃO

Na área industrial são utilizadas estruturas metálicas que muitas vezes fazem parte de componentes estruturais ou são importantes para o correto funcionamento de determinado equipamento. A presença de uma falha em alguma estrutura que demande alta confiabilidade pode resultar em prejuízos econômicos e em sérios riscos ambientais dependendo de sua aplicação. Para prevenir falhas e monitorar a integridade de estruturas industriais são utilizados ensaios não-destrutivos (END), os quais apresentam a vantagem de avaliar a estrutura sem a necessidade de danificá-la. Essa característica permite o desenvolvimento de técnicas de avaliação e monitoramento de integridade estrutural de um componente, que servem para localizar e dimensionar alguma falha presente no material.

A utilização de técnicas com ondas guiadas vem avançando de forma considerável nas últimas décadas para a aplicação em ensaios não destrutivos e técnicas de monitoramento estrutural. Esta técnica apresenta uma grande vantagem em relação a técnicas pontuais, como o ultrassom convencional, por inspecionar grandes áreas simultaneamente, gerando economia de tempo e de custos de operação. Nesta técnica, a onda mecânica emitida por uma perturbação propaga-se através da seção transversal da estrutura, podendo percorrer grandes distâncias e permitindo inspecionar trechos extensos de uma estrutura a partir de um único ponto de acesso (ROSE, 2014), facilitando a inspeção de pontos remotos ou de difícil acesso como, por exemplo, em tubulações com revestimento externo ou submersas.

Em inspeções não destrutivas abrangendo grandes áreas, técnicas de ondas guiadas são aplicadas preferencialmente utilizando modos de propagação em baixas frequências, pois desta forma apenas os modos fundamentais de propagação podem ser excitados. Em estruturas com formato de chapas existem três modos fundamentais, são eles o modo S_0 , A_0 e SH_0 . Entre estes três modos, o modo SH_0 apresenta alguns benefícios para testes não destrutivos, como possuir uma natureza não dispersiva (GRAFF, 1991), o que permite uma boa resolução na detecção de falhas em uma estrutura. O efeito da dispersão, presente nos modos de propagação S_0 e A_0 , aumenta a duração do sinal e diminui sua amplitude (WILCOX, LOWE, CAWLEY, 2001). Além disso, o modo SH_0 sofre menores atenuações ao se propagar em superfícies em contato com fluidos (MA, CAWLEY, 2010), pois o mesmo apresenta seus maiores deslocamentos dentro do plano da estrutura que serve como guia de ondas, interagindo menos com algum fluido que esteja em contato com a estrutura. Desta forma, a utilização do modo SH_0 pode ser considerada uma maneira promissora para detectar

presença de corrosão, perda de espessura ou trincas em estruturas como vasos de pressão, tanques ou cascos de navios, onde as mesmas geralmente estão em contato com algum tipo de fluido, como água do mar, petróleo ou soluções de produtos químicos.

As ondas guiadas podem ser emitidas na estrutura a ser inspecionada através de transdutores projetados para excitar determinado modo de propagação. Um transdutor de ondas guiadas omnidirecional permite a emissão e recepção de ondas de forma uniforme em todas as direções. Esta característica possibilita a utilização de arranjos de transdutores em técnicas para localização de defeitos e geração de imagens baseadas na emissão de um sinal omnidirecional, como em técnicas de triangulação de sinais. A possibilidade de gerar de forma uniforme apenas um modo de propagação apresenta a vantagem de diminuir sinais gerados por outros modos, que podem interferir na detecção de um defeito na estrutura e aumentar a complexidade na interpretação dos resultados de uma inspeção (WILCOX, 2003).

Este trabalho tem como objetivo propor um modelo de transdutor do modo SH_0 de forma omnidirecional a partir de um arranjo com cerâmicas piezoelétricas. A motivação para desenvolver um transdutor com estas características se dá pela possibilidade de emitir um único modo de propagação e receber sinais gerados pela interação deste modo com defeitos na estrutura, possibilitando o monitoramento de determinada área de inspeção a partir da instalação de um único transdutor. Com o intuito de caracterizar a melhor faixa de frequência de operação do transdutor proposto e de avaliar como determinados parâmetros influenciam a sua resposta, é apresentado um estudo através de simulações numéricas e ensaios práticos indicando a resposta do sensor para os modos A_0 e SH_0 . É feita a avaliação da amplitude dos modos para cada frequência e da qualidade da omnidirecionalidade do modo SH_0 .

A organização desta dissertação segue a seguinte estrutura: após a introdução, no Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica dos assuntos envolvidos no trabalho, abordando aspectos sobre avaliação de integridade estrutural, ondas guiadas, transdutores do modo SH_0 omnidirecional e piezoeletricidade. No Capítulo 3 é detalhada a metodologia utilizada no trabalho, apresentando aspectos dos modelos de elementos finitos realizados, da geração dos resultados obtidos, além de apresentar detalhes da construção do transdutor e equipamentos utilizados nos ensaios práticos. Os resultados e discussões das simulações numéricas e da parte experimental são apresentados no Capítulo 4, e no Capítulo 5 são realizadas as conclusões do trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os principais temas envolvidos no trabalho. A presente revisão descreve fundamentos sobre avaliação de integridade estrutural, sobre a técnica de ondas guiadas, apresenta conceitos de transdutores do modo SH_0 omnidirecional anteriormente propostos e descreve características de materiais e transdutores piezoelétricos.

2.1 Avaliação de Integridade Estrutural

A avaliação de integridade estrutural consiste na implementação de estratégias de identificação de danos em uma estrutura (WORDEN et al., 2007). Danos podem ser considerados como mudanças, sejam físicas, geométricas ou de outra natureza, que afetam negativamente a performance ou segurança de determinado sistema. De uma forma geral, os danos começam a um nível material, na forma de pequenos defeitos ou falhas oriundas de processo de fabricação ou de condições de operação de um componente. Sob o efeito de carregamentos ou ambientes agressivos estes defeitos podem crescer até dimensões que levem o sistema a operar em condições não mais aceitáveis, neste ponto ocorre uma falha (FARRAR, WORDEN, 2007). Os danos podem apresentar um crescimento acumulado com o passar do tempo como em casos associados com a presença de fadiga ou corrosão, como pode ser visto na Figura 1, onde a presença de corrosão levou ao vazamento do fluido transportado pela tubulação.

Figura 1 – Vazamento em Tubulação devido à presença de corrosão



Fonte: FLORIDA CORROSION CONTROL, 2017

O processo de monitoramento estrutural envolve a observação da estrutura com a realização de medições periodicamente distribuídas. Através de uma análise das características do defeito e um estudo estatístico destes dados se pode determinar o estado atual de integridade do sistema (FARRAR, WORDEN, 2007). O monitoramento da presença e da dimensão de defeitos em uma estrutura pode evitar acidentes, gastos de manutenção relacionados a paradas não programadas ou mesmo desastres ambientais. Para minimizar os riscos de falhas inesperadas é importante detectar, diagnosticar e monitorar o crescimento de defeitos da forma mais precisa possível, estimando assim a vida operacional remanescente de um sistema (GALVAGNI, 2013).

Para monitorar estruturas físicas é necessário utilizar ensaios não-destrutivos (END), que possibilitam a avaliação de um componente sem comprometer a integridade da estrutura analisada. Atualmente existem variadas técnicas de END como ensaios por ultrassom, radiografia, líquidos penetrantes, correntes parasitas, emissão acústica, ensaios por ondas guiadas, entre outras. Cada técnica é aplicada conforme a característica da estrutura, do material e do tipo de defeito a ser analisado (ASM HANDBOOK, 1989).

Em estruturas grandes, onde técnicas pontuais necessitariam muito tempo para um ensaio completo, pode-se utilizar ensaios com ondas guiadas. Nesta técnica é emitida uma onda mecânica que tem a capacidade de percorrer grandes distâncias ao se propagar através da estrutura, permitindo inspecionar uma grande área a partir de um único ponto de acesso. Realizando a fixação de transdutores de ondas guiadas permanentemente na estrutura, através de um arranjo apropriado, se torna possível a realização de um monitoramento contínuo do sistema ao longo do tempo.

Uma configuração com sensores fixados permanentemente também pode ser aplicada para a localização de defeitos como propagação de trincas por fadiga em estruturas com grande área, através de técnicas de emissão acústica (WILCOX, 1998). Um sistema de monitoramento por ondas guiadas fixado permanentemente pode ser visto na Figura 2, onde o anel de transdutores é fixado para monitoramento de um trecho de tubulação com difícil acesso. Uma avaliação de integridade estrutural eficiente necessita a utilização de sensores confiáveis, sensíveis o suficiente para detectar pequenas mudanças na estrutura e também robustos o bastante para operar em ambientes agressivos (GALVAGNI, 2013).

Figura 2 – Monitoramento de duto por sensor instalado permanentemente



Fonte: GUIDED ULTRASONICS LTD., 2017

2.2 Ondas Guiadas

A propagação de ondas em meios sólidos infinitos ocorre de duas formas distintas, através de ondas P (primárias) ou ondas S (secundárias). Durante a propagação das ondas P o sólido sofre tensões compressivas e trativas, sendo que o movimento das partículas do sólido ocorre na direção do movimento da onda. No caso das ondas S, são transmitidas tensões cisalhantes entre as partículas e a direção do movimento das partículas é transversal ao movimento da onda (GRAFF, 1991). Estas duas formas de propagação possuem velocidades definidas pelas propriedades do meio material pelo qual se propagam. A velocidade de propagação das mesmas pode ser obtida através da solução da equação de movimento para um corpo elástico, linear, isotrópico com uma força externa aplicada (MOORE et al, 2005). As velocidades de propagação c_1 e c_2 referentes às ondas P e S são apresentadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente, onde λ_L e μ_L são as constantes de Lamé e ρ corresponde à massa específica do material do corpo.

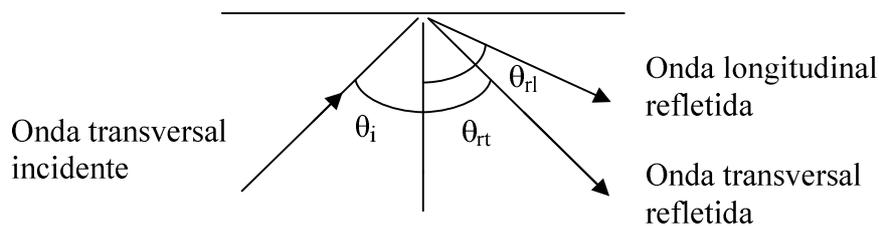
$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda_L + 2\mu_L}{\rho}} \quad (1)$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu_L}{\rho}} \quad (2)$$

Quando as ondas se propagam em meios finitos, que possuem limites físicos na estrutura do material, elas irão interagir com as fronteiras do corpo pela qual se propagam. Em

meios sólidos, esta reflexão é regida pela Lei de Snell (MOORE et al, 2005), que demonstra que uma onda transversal S incidente sobre uma superfície livre refletora irá se separar em uma onda transversal S e uma onda longitudinal P, refletidas respectivamente em ângulos θ_{rt} (que é igual a θ_i) e θ_{rl} . Esse comportamento é ilustrado na Figura 3, onde uma onda transversal incidente é refletida em uma superfície.

Figura 3 – Reflexão de uma onda transversal em uma superfície livre



Esta mudança de comportamento da onda ao interagir com superfícies de uma estrutura física leva à geração de modos característicos de propagação das ondas. Em estruturas que tenham superfícies que sirvam como um guia de ondas, estes modos irão propagar com velocidades diferentes, que dependem não mais apenas das propriedades mecânicas do meio, mas também da frequência com a qual a perturbação se propaga e da geometria do meio. Este fenômeno ocorre quando o comprimento da onda emitida é comparável a uma ou mais dimensões do meio, o que ocorre em estruturas laminares, como chapas, além de hastes, barras ou tubos. Estes modos característicos podem ser representados através das curvas de dispersão, que mostram a relação entre a frequência e a velocidade de propagação para uma determinada geometria e material (ROSE, 2003).

A solução consolidada para a construção das curvas de dispersão em uma placa infinita foi obtida por Lamb através da resolução das Equações de Rayleigh-Lamb. Estas equações são descritas pelas Equações 3 e 4, que representam os modos simétricos e assimétricos, respectivamente (AULD, 1973).

$$\frac{\tan\left(k_{ts} \frac{b}{2}\right)}{\tan\left(k_{tl} \frac{b}{2}\right)} = -\frac{4\beta^2 k_{tl} k_{ts}}{\left(k_{ts}^2 - k^2\right)^2} \quad (3)$$

$$\frac{\tan\left(k_{ts} \frac{b}{2}\right)}{\tan\left(k_{tl} \frac{b}{2}\right)} = -\frac{\left(k_{ts}^2 - k^2\right)^2}{4\beta^2 k_{tl} k_{ts}} \quad (4)$$

A variável b representa a espessura da placa, k o número de onda na direção de propagação, k_{ts} e k_{tl} representam, respectivamente, as componentes do número de onda referentes às ondas transversais e longitudinais propagando no guia de ondas. Os números de onda k_{tl} e k_{ts} são representados pelas Equações 5 e 6.

$$k_{tl}^2 = \left(\frac{\omega}{c_1}\right)^2 - k^2 \quad (5)$$

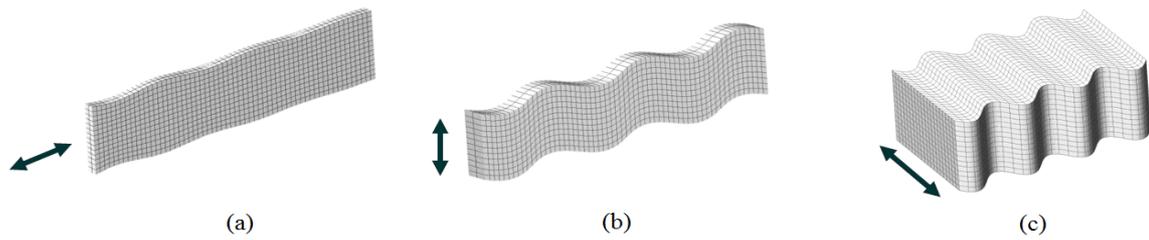
$$k_{ts}^2 = \left(\frac{\omega}{c_2}\right)^2 - k^2 \quad (6)$$

Nas equações acima, ω representa a frequência angular da onda e as constantes c_1 e c_2 representam as velocidades de propagação das ondas longitudinais e transversais, respectivamente. Os pares de valores k e ω que possuem solução para as equações de Rayleigh-Lamb descritas acima são apresentados através das curvas de dispersão como modos simétricos (S) e antissimétricos (A). Os modos S possuem simetria em relação à linha central do guia de ondas e os modos A possuem anti-simetria em relação à mesma linha, conforme pode ser visto na Figura 4.

Em placas, além dos modos S e A, existem também os modos SH (*Shear Horizontal*), que possuem movimento cisalhante perpendicular ao plano apresentado na Figura 3. As curvas de dispersão referentes aos modos SH podem ser representadas através da relação apresentada na Equação 7 (ROSE, 2014), onde n é um número inteiro referente ao modo representado e c_p é a velocidade de fase do modo de propagação. Na Figura 4 também pode ser visualizado o movimento perpendicular gerado pelo modo SH.

$$\frac{\omega^2}{c_2^2} - \frac{\omega^2}{c_p^2} = \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (7)$$

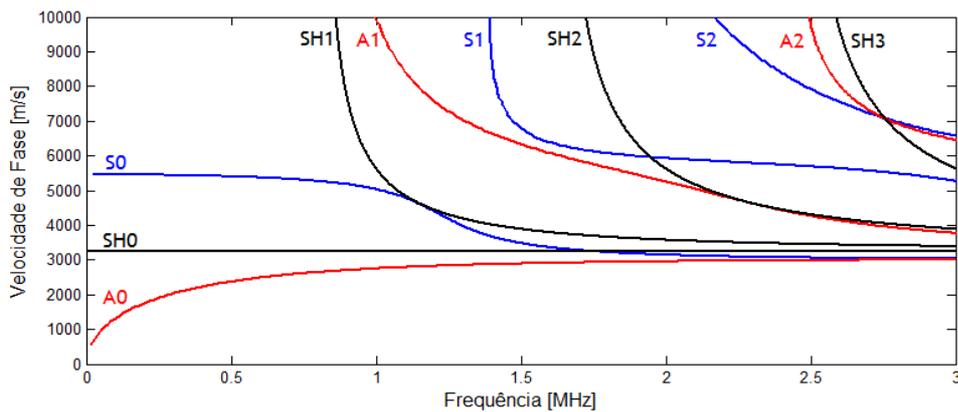
Figura 4 – Formato dos Modos de Propagação. (a) Modo S. (b) Modo A. (c) Modo SH



Fonte: Adaptado de GUIDEDWAVE, 2017

As curvas de dispersão presentes até 3MHz referentes à uma chapa de aço de 2mm de espessura podem ser vistas na Figura 5, que mostram a relação entre velocidade de fase e frequência. É possível notar que para frequências abaixo de 800kHz apenas os modos fundamentais podem ser propagados. Esta característica se apresenta como uma vantagem para a utilização de frequência menores em ensaios com ondas guiadas, pois a ausência de um elevado número de modos propagando concomitantemente na estrutura facilita a aquisição de sinais e o tratamento de dados, diminuindo o ruído gerado por modos de propagação emitidos de forma indesejada.

Figura 5 – Curvas de dispersão para Chapa de aço com espessura de 2mm



Fonte: DISPERSE, 2016

Os modos de propagação também podem ser representados através da velocidade de grupo (c_g). A velocidade de grupo refere-se à velocidade com que um pacote de ondas com

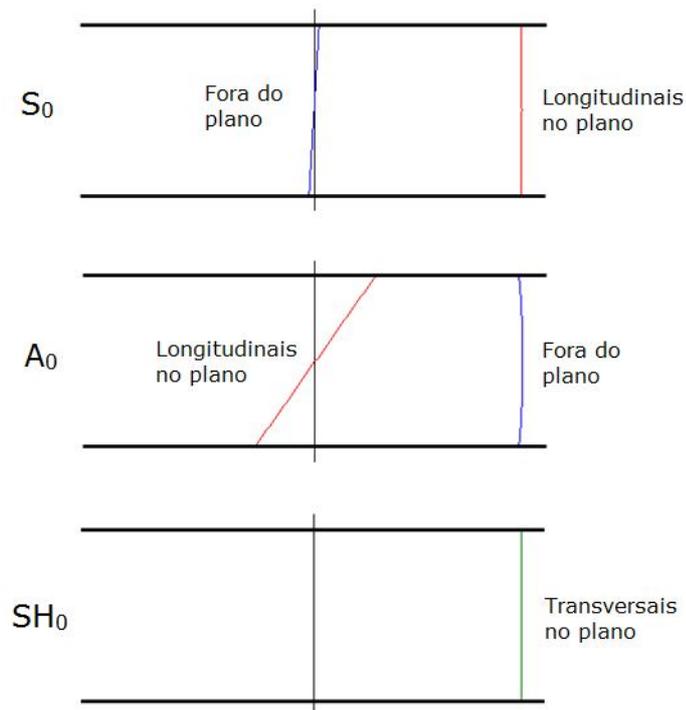
frequências similares propaga através de uma estrutura (ROSE, 2014), e pode ser obtida através da derivada presente na Equação 8.

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (8)$$

Entre os modos fundamentais o modo SH_0 possui velocidade de fase constante para todas as frequências. Esta característica não dispersiva do modo SH_0 pode apresentar vantagens para a obtenção de uma melhor resolução na detecção de falhas em uma estrutura, visto que o efeito da dispersão, presente nos modos de propagação S_0 e A_0 , aumenta a duração do sinal e diminui sua amplitude (WILCOX, LOWE, CAWLEY, 2001).

O fato dos deslocamentos gerados no material por cada um destes modos serem diferentes permite a detecção de diferentes modos analisando a amplitude de deslocamentos fora do plano, longitudinais no plano e transversais no plano de determinada estrutura. Para uma frequência de 50kHz, onde existem apenas os modos fundamentais para uma chapa de aço de 2mm de espessura, os perfis de deslocamentos para cada um destes modos ao longo da espessura podem ser visualizados na Figura 6.

Figura 6 – Deslocamentos dos Modos Fundamentais ao longo da espessura da chapa



Fonte: Adaptado de DISPERSE, 2016

2.3 Conceitos de Transdutores do modo SH₀ Omnidirecional

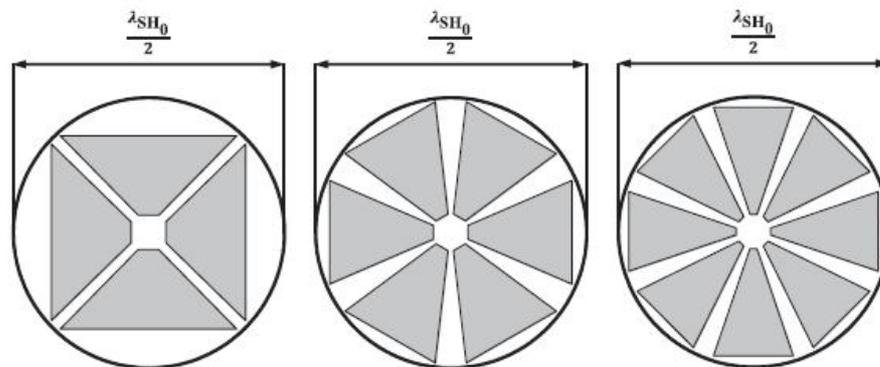
Transdutores eletromecânicos convertem energia elétrica em mecânica, e vice-versa, servindo desta forma para transformar fenômenos físicos em sinais elétricos. Neste capítulo são apresentados modelos de transdutores do modo SH₀ omnidirecional propostos por outros autores. Estes modelos fazem uso diferentes princípios físicos, como piezoelectricidade, magnetostricção e magnetismo.

2.3.1 Utilização de cerâmicas piezoelétricas

Conceitos de transdutores para gerar o modo SH₀ de forma omnidirecional utilizando um arranjo de cerâmicas piezoelétricas já foram propostos por alguns autores nos últimos anos. Um dos conceitos semelhantes ao proposto no presente trabalho foi feito por Belanger e Boivin (2016). Neste trabalho a geração apenas do modo SH₀ sem a presença de S₀ e A₀ baseia-se no fato de que em um arranjo com infinitas fontes piezoelétricas de excitação, que geram estes três modos em diferentes direções, a sobreposição dos modos A₀ e S₀ poderia se anular (por estarem em oposição de fase) e o modo SH₀ gerado por estas fontes teria uma interferência construtiva por estarem em fase.

Para construir este transdutor foram utilizadas cerâmicas piezoelétricas PZT-5H, posicionadas conforme pode ser visto na Figura 7, onde foram feitas comparações envolvendo diferentes formatos e números de cerâmicas.

Figura 7 - Conceitos de arranjos de cerâmicas piezoelétricas testados por Belanger e Boivin



Fonte: BELANGER, BOIVIN, 2016

Este conceito foi proposto para operar entre 50 e 150kHz, de forma que o diâmetro do transdutor foi fixado em $\lambda_{SH_0}/2$ para a frequência de 100kHz. Após um estudo sobre o efeito da dimensão das cerâmicas foi testado um protótipo em uma chapa de alumínio de 1.6mm de espessura. O modelo produzido pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Modelo experimental do transdutor proposto por Belanger e Boivin



Fonte: BELANGER, BOIVIN, 2016

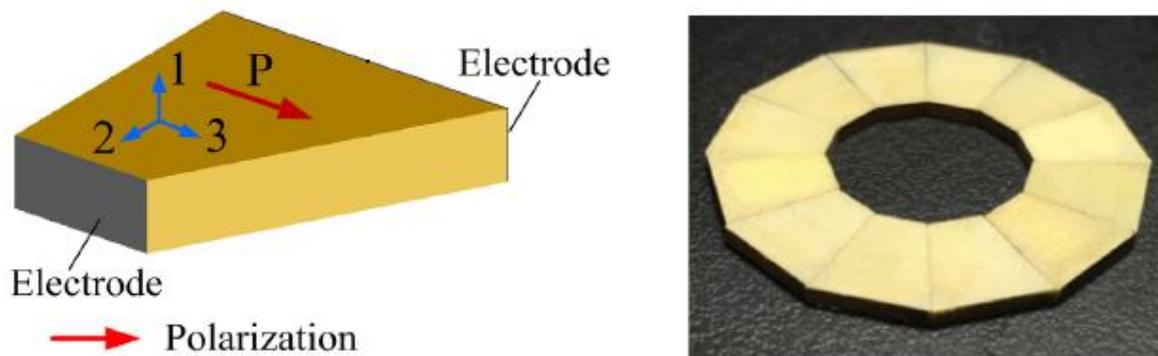
No modelo experimental o arranjo foi fixado na placa através de adesivo epóxi condutivo de prata. Os resultados apresentados por este modelo a 100kHz apresentaram uma relação entre a intensidade dos modos SH_0 e A_0 de 25dB em simulações numéricas e 17dB nas medidas experimentais. Embora este conceito tenha apresentado ótima direcionalidade em simulações numéricas, em experimentos práticos apresentou desvios maiores do modo SH_0 ao longo de diferentes direções medidas.

Neste conceito não foi detectada a emissão do modo S_0 , o modo A_0 foi produzido devido a movimentos gerados pela massa da cerâmica piezoelétrica, que tensionava a superfície abaixo dela na direção fora do plano.

Outro conceito de transdutor do modo SH_0 de forma omnidirecional foi proposto recentemente por Miao et al. (2017). Este modelo é semelhante ao comentado anteriormente, sendo que neste as dimensões da cerâmica piezoelétrica foram definidas para que a diferença entre os raios interno e externo do transdutor possuíssem medida equivalente à meio comprimento de onda do modo SH_0 na frequência desejada para maior resposta. Neste conceito a aplicação do campo elétrico é feita através das laterais das cerâmicas piezoelétricas. Com a intenção de operar entre 160 e 220kHz, essa medida foi dimensionada

em 8mm, se aproximando de meio comprimento de onda de 190kHz. Uma imagem deste modelo pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Modelo experimental do transdutor proposto por Miao et al



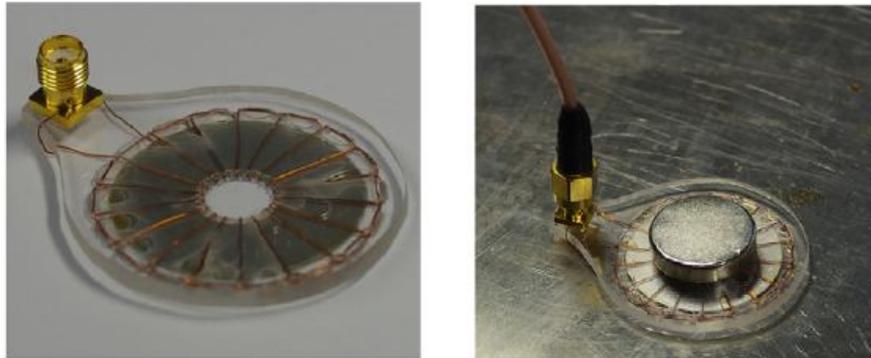
Fonte: MIAO et al, 2017

Este modelo foi fixado em uma placa de alumínio de 1mm de espessura através de adesivo epóxi, onde foi avaliada a emissão e a recepção do modo SH_0 do transdutor. Os resultados apresentados mostraram que houve também emissão do modo A_0 , com intensidade de uma ordem de grandeza a menos que o SH_0 . Em relação à emissão e recepção do modo SH_0 , este transdutor apresentou desvios de aproximadamente 10% da amplitude do modo SH_0 em relação à média ao longo de uma faixa de 90° analisada.

2.3.2 Utilização de material magnetostrictivo

A magnetostricção é um fenômeno que ocorre quando um campo magnético dinâmico e um campo magnético estático são aplicados mutuamente em direções perpendiculares a um material com propriedades magnetostrictivas, de forma que uma deformação é induzida neste material (JILES, 1995). Partindo deste princípio, Seung, Kim e Kim (2016) desenvolveram um transdutor do modo SH_0 omnidirecional utilizando um núcleo feito de níquel, envolto por uma bobina toroidal. Com a utilização de um ímã permanente sobre este conjunto, foi possível induzir um movimento circular no núcleo magnetostrictivo de níquel. Ao acoplar o conjunto em uma chapa de alumínio de 1mm através de resina epóxi, este movimento do núcleo gerou a excitação do modo SH_0 de forma omnidirecional na chapa. Uma ilustração do modelo magnetostrictivo do transdutor pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10 - Modelo experimental do transdutor magnetostrictivo proposto por Seung, Kim e Kim.



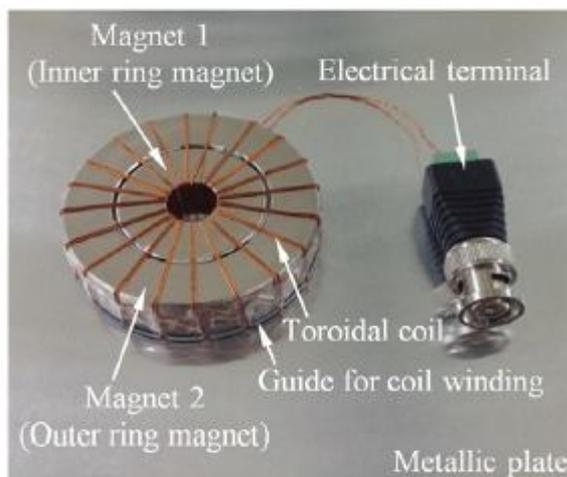
Fonte: SEUNG, KIM, KIM, 2016

Os resultados obtidos com este modelo de transdutor apresentaram a geração do modo SH_0 com uma distribuição omnidirecional considerada satisfatória tanto na emissão como na recepção do modo SH_0 . Este conceito também foi construído considerando a diferença entre o raio interno e externo do núcleo sendo igual a meio comprimento de onda da frequência de operação desejada, através de medidas experimentais foi demonstrado pelos autores que nestas frequências foi obtida a maior amplitude de emissão do modo SH_0 .

2.3.3 Utilização de EMATs

Os transdutores acústicos eletromagnéticos (EMATs) são utilizados para induzir ondas em um material a partir da interação de dois campos magnéticos. Um campo magnético dinâmico gerado por uma bobina interage com um campo estático produzido por um ímã, gerando forças de Lorenz e estas perturbações são transferidas para o material, produzindo ondas elásticas. Um conceito de transdutor de ondas SH_0 omnidirecionais também foi proposto por Seung, Park e Kim (2016), a partir da utilização de dois ímãs em formato de anel com polarização invertida posicionados concentricamente e envoltos por uma bobina toroidal. Um esquema deste modelo pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Modelo experimental do EMAT proposto por Seung, Park e Kim



Fonte: SEUNG, PARK, KIM, 2016

Este conceito foi testado em uma frequência de 130kHz tanto na emissão como na recepção de ondas SH_0 . Os resultados referentes a uma faixa de 180° apresentados mostraram uma diferença máxima de amplitude do sinal de 8% na emissão e 9% na recepção, considerado pelo autor uma distribuição omnidirecional satisfatória. Resultados referentes à geração de outros modos como S_0 e A_0 foram considerados desprezíveis e não foram apresentados.

2.4 Piezoelectricidade

Determinados materiais, como cristais encontrados na natureza, polímeros ou cerâmicas, possuem a propriedade de se deformarem quando submetidos a um campo elétrico, da mesma forma que se tornam eletricamente polarizados quando submetidos a uma deformação mecânica, esse fenômeno é conhecido como efeito piezoelétrico de um material.

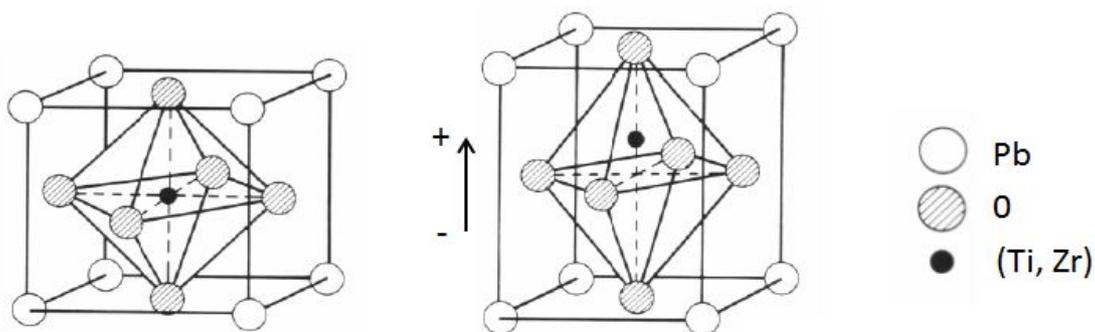
Cerâmicas piezoelétricas são bastante utilizadas na construção de transdutores por possuírem alta sensibilidade (em comparação a cristais piezoelétricos encontrados na natureza) e por apresentarem a possibilidade de fabricação em diversos formatos e tamanhos. Entre as muitas aplicações de cerâmicas piezoelétricas, pode-se citar a sua utilização em acelerômetros, sistemas sonar, equipamentos médicos, detectores de movimento e transdutores para ensaios não destrutivos (FERROPERM PIEZOCERAMICS, 2016).

2.4.1 Estrutura atômica de materiais piezoelétricos

O efeito piezoelétrico ocorre em materiais que não possuem um centro de simetria em sua estrutura cristalina. Quando o material é deformado elasticamente, o centro de gravidade das cargas positivas e negativas é deslocado, e a falta de simetria da estrutura impede que as cargas elétricas se cancelem umas com as outras. Cerâmicas piezoelétricas em sua forma natural são materiais dielétricos, pois não possuem partículas livres que conduzam corrente elétrica. Esses materiais podem ser constituídos por moléculas polares, que apresentam dipolos elétricos, porém, devido à distribuição aleatória destas moléculas, macroscopicamente o material se apresenta neutro. Quando uma cerâmica deste tipo é submetida à um forte campo elétrico, as moléculas polares do material irão se alinhar na direção do campo e o material se torna então polarizado. Mesmo materiais dielétricos que não possuem moléculas polares podem passar pelo processo de polarização, pois a presença de um forte campo elétrico externo poderá induzir dipolos elétricos na estrutura.

Alguns materiais piezoelétricos são também ferroelétricos, onde cada célula unitária da rede cristalina possui um momento de dipolo elétrico permanente. Esse tipo de material pode ser polarizado através da aplicação de um forte campo elétrico e de altas temperaturas, apresentando efeito piezoelétrico permanente na direção da polarização. A polarização só será desfeita caso o material seja submetido à temperaturas superiores a temperatura de Curie, neste caso as direções do dipolo se tornariam aleatórias novamente (KINO, 1987). Um material cerâmico ferroelétrico bastante utilizado na fabricação de transdutores é o zirconato-titanato de chumbo ($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ou PZT), material que possui estrutura do tipo perovskita, como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Estrutura do $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ acima e abaixo (polarizado) da temperatura de Curie



Abaixo da temperatura de Curie esse material não apresenta um centro de simetria na estrutura cristalina de sua célula unitária, formando assim uma célula unitária polar. Ao passar por um processo de polarização, este material irá apresentar propriedades piezoelétricas permanentes na direção desejada.

2.4.2 Propriedades Constitutivas

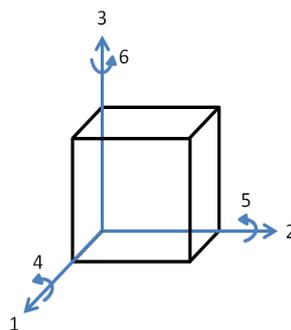
O comportamento mecânico de cerâmicas piezoelétricas é descrito através de relações constitutivas que relacionam deformações mecânicas e elétricas devido à aplicação de carregamentos mecânicos ou elétricos. As relações constitutivas para um material piezoelétrico podem ser vistas nas equações 9 e 10, que relacionam o vetores de deformações $\{S\}$ e de deslocamento elétrico $\{D\}$ com os vetores de campo elétrico $\{E\}$ e com o de tensões $\{T\}$.

$$\{T\} = [C^E]\{S\} - [e]\{E\} \quad (9)$$

$$\{D\} = [e]^T\{S\} + [\varepsilon^S]\{E\} \quad (10)$$

Nas equações acima, $[e]$ é a matriz de constantes piezoelétricas que relaciona tensão mecânica com o campo elétrico, $[\varepsilon^S]$ é a matriz de constantes dielétricas obtida mantendo deformações constantes e $[C^E]$ é a matriz de rigidez obtida mantendo um campo elétrico constante. Inicialmente a cerâmica é um material isotrópico, porém ao passar pelo processo de polarização o seu comportamento se torna ortotrópico. Considerando o sistema de coordenadas mostrado pela Figura 13, e considerando que o sentido da polarização é o mesmo do eixo 3, as matrizes de rigidez, de constantes dielétricas e de constantes piezoelétricas podem ser vistas nas equações 11, 12 e 13, respectivamente.

Figura 13 – Eixo de coordenadas considerado para a construção das relações constitutivas



$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}, \text{ onde } C_{66} = \frac{1}{2}(C_{11} - C_{22}) \quad (11)$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Pode-se representar as equações 9 e 10 considerando anisotropia na direção de polarização (direção 3), através de uma notação matricial a partir das matrizes acima conforme a Equação 14.

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^E & C_{12}^E & C_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{31} \\ C_{12}^E & C_{22}^E & C_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{31} \\ C_{13}^E & C_{13}^E & C_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44}^E & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55}^E & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & -\varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{11}^S & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ S_{23} \\ S_{13} \\ S_{12} \\ -E_1 \\ -E_2 \\ -E_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

As relações constitutivas do material piezoelétrico também podem ser descritas através das equações 15 e 16.

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad (15)$$

$$\{D\} = [d]^T\{T\} + [\varepsilon^T]\{E\} \quad (16)$$

Nas equações acima, $[d]$ é a matriz de coeficientes piezoelétricos que relaciona deformações mecânicas com o campo elétrico, $[\varepsilon^T]$ é a matriz de constantes dielétricas obtida mantendo tensões constantes e $[s^E]$ é a matriz de flexibilidade obtida mantendo um campo elétrico constante. Os coeficientes piezoelétricos d_{ij} relacionam deslocamento elétrico com tensão mecânica ou deformação com campo elétrico. Altos coeficientes d_{ij} são desejáveis em materiais utilizados como transdutores, devido à maior resposta elétrica ou mecânica obtida.

2.4.3 Características dos transdutores piezoelétricos

Algumas características devem ser observadas ao se utilizar um material piezoelétrico para a construção de um transdutor, como as suas dimensões físicas, posição do campo elétrico ao qual foi submetido e tipo do material utilizado. A resposta a estímulos elétricos pode variar de acordo com estas características. Um fator importante é a resposta em frequência da cerâmica piezoelétrica, que relaciona a amplitude da resposta mecânica do sistema para uma determinada excitação em função da frequência de excitação. Através da análise da resposta em frequência se pode visualizar qual a faixa de operação mais apropriada para determinadas dimensões de uma cerâmica, onde a resposta apresenta maior uniformidade, além de determinar quais frequências apresentam ressonância. Trabalhar em faixas de frequências que apresentam grandes ressonâncias pode não ser interessante em uma etapa de tratamento de dados, podendo dificultar a visualização de sinais obtidos próximos da frequência de ressonância.

As propriedades mecânicas e elétricas presentes nas relações constitutivas variam de acordo com o tipo de cerâmica utilizada. Dependendo da natureza do esforço ao qual a cerâmica será submetida, pode-se escolher um material que apresente propriedades vantajosas para essa finalidade. Em uma cerâmica que se deforma apresentando movimento cisalhante, por exemplo, é interessante selecionar um material que tenha alto coeficiente d_{15} , visto que este relaciona a resposta da cerâmica a tensões cisalhantes.

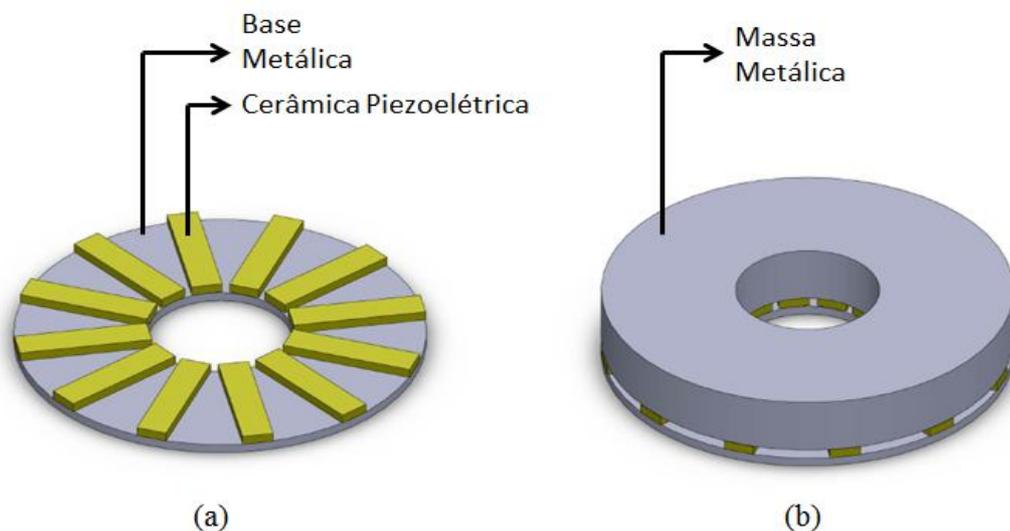
2 METODOLOGIA

Nesta seção são descritos detalhes do transdutor, os materiais, equipamentos e técnicas utilizadas no desenvolvimento do trabalho. Inicialmente são apresentadas as configurações utilizadas no modelo de transdutor proposto, em seguida são detalhados os procedimentos utilizados na geração dos modelos de elementos finitos e por fim é apresentado o procedimento realizado nos ensaios práticos.

3.1 Configuração do Transdutor

O transdutor foi planejado para emitir o modo SH_0 omnidirecional a partir de um arranjo de cerâmicas piezoelétricas, para operar em uma faixa de frequências relativamente baixas, entre 20kHz e 100kHz. Este arranjo foi construído posicionando-se as cerâmicas simetricamente em uma base circular, com o intuito de gerar um movimento circular através da base para que a mesma transmita tensões torcionais até a estrutura, gerando o modo SH_0 . Na Figura 14 (a), pode-se visualizar a configuração do transdutor, que é formado por uma base metálica e pelo arranjo de cerâmicas. Além da base metálica que é fixada no material a ser inspecionado, também foi avaliado o efeito de uma massa metálica, conforme Figura 14 (b), fixada na face superior do arranjo de cerâmicas piezoelétricas.

Figura 14 – Configuração do Transdutor (a) Sem a presença da massa metálica (b) Com a presença da massa metálica

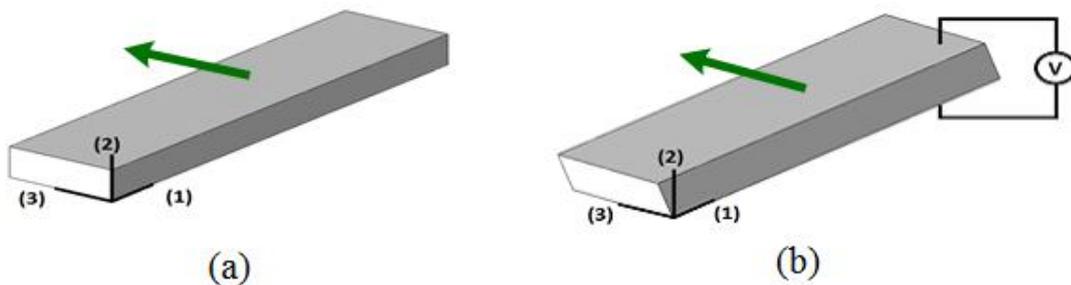


Com o aumento da massa no sistema espera-se que a amplitude da resposta gerada pelo transdutor aumente em menores frequências, entre 20 e 60kHz, fenômeno já avaliado em outros trabalhos com sensores piezoelétricos, como por Clarke (2009).

Os elementos cerâmicos utilizados são feitos de zirconato-titanato de chumbo (PZT), material que apresenta momento de dipolo elétrico. As propriedades utilizadas para simular o efeito desta cerâmica são referentes à cerâmica comercial PZ27, conforme o catálogo do fabricante Ferroperm Piezoceramics (2016).

Os formatos da cerâmica original e da cerâmica deformada, quando submetida a uma tensão elétrica, podem ser vistos na Figura 15. A polarização dos elementos piezoelétricos utilizados é feita no mesmo sentido do eixo 3, indicada pela seta na Figura 15. O movimento gerado pela aplicação da tensão elétrica nas faces inferior e superior da cerâmica é uma deformação no sentido da polarização do material.

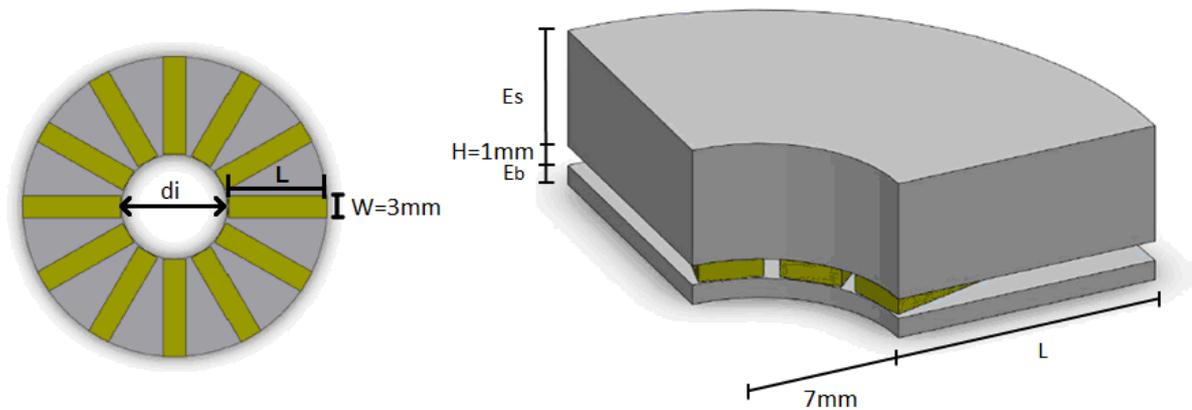
Figura 15 – (a) Cerâmica não-deformada (b) Cerâmica deformada



Para avaliar a influência dos parâmetros do transdutor na resposta em frequência obtida, foram realizados estudos por elementos finitos parametrizando estas variáveis. Através destes estudos pode-se estimar as dimensões e configurações necessárias para melhor operação do transdutor na faixa de frequência desejada, entre 20 e 100kHz, avaliando relação de amplitude dos modos SH_0 e A_0 presentes na resposta e a omnidirecionalidade obtida do modo SH_0 .

Os parâmetros geométricos presentes no modelo podem ser vistos no esquema presente na Figura 16.

Figura 16 – Parâmetros Geométricos



Nesta esquematização estão presentes o diâmetro interno (d_i), a espessura da cerâmica piezoelétrica (H) e a largura da cerâmica (W). Estes três parâmetros foram mantidos constantes durante todas as análises, seus valores são apresentados na Tabela 1. Os demais parâmetros, que foram variados durante as análises, são o comprimento da cerâmica piezoelétrica (L), a espessura da base metálica (E_b), a espessura da massa metálica superior (E_s) e o número de cerâmicas piezoelétricas (N).

Tabela 1 – Parâmetros mantidos constantes durante todas as análises

Constantes	Medida
d_i	14 mm
W	3 mm
H	1 mm

Inicialmente foi avaliada a influência do número de cerâmicas presentes no arranjo circular. Neste estudo foram mantidas constantes as dimensões geométricas da cerâmica e das peças metálicas que compõe o modelo. Na Tabela 2 são apresentados os valores utilizados na avaliação do número de cerâmicas (Estudo 1). Neste estudo não foi considerada a massa metálica superior.

Para avaliar a influência da espessura da base metálica e do comprimento das cerâmicas piezoelétricas foram gerados modelos variando os parâmetros L e E_b , mantendo constante o número de cerâmicas (N) e desconsiderando a presença da massa metálica superior (E_s). Os valores utilizados nesta avaliação podem ser vistos na Tabela 2 (Estudo 2).

Por fim foi realizado um estudo para avaliar a influência da massa metálica superior no modelo proposto. Os valores utilizados nesta avaliação são referentes ao Estudo 3 da Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nos estudos por elementos finitos

	Estudo 1	Estudo 2	Estudo 3
N	4, 8 e 12 un.	12 un.	12 un.
L	13 mm	3, 13 e 23 mm	13 mm
E_b	1 mm	0,2, 1, 2 e 3 mm	2 mm
E_s	-	-	2, 6 e 10 mm

3.2 Simulação por Elementos Finitos

Para simular a resposta dos modos SH_0 e A_0 na faixa de frequências considerada, foi utilizado o software comercial de elementos finitos ABAQUS no modo de análise *steady-state dynamics* (ABAQUS DOCUMENTATION, 2016). Esta análise é baseada na resolução da equação de movimento de um sistema, descrita pela Equação 17 onde x representa os deslocamentos da resposta, F_0 a amplitude da excitação, ω a frequência da força de excitação do sistema, $[M]$ a matriz de massas do sistema, $[\hat{C}]$ a matriz de amortecimento do sistema, $[\hat{K}]$ a matriz de rigidez do sistema e t o tempo.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [\hat{C}]\{\dot{x}\} + [\hat{K}]\{x\} = \{F_0\} \cos(\omega t) \quad (17)$$

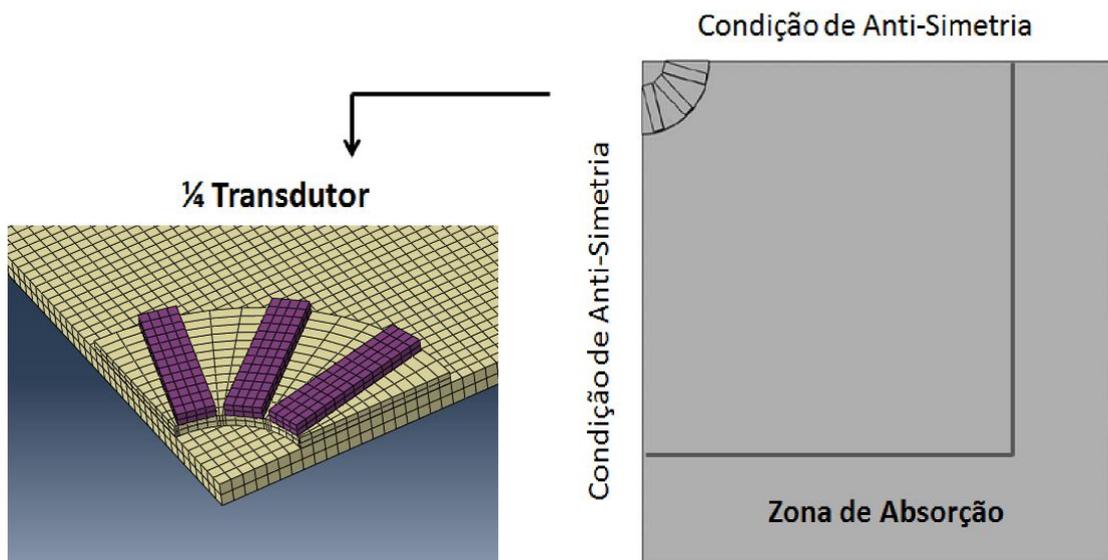
A partir de uma varredura pelas frequências desejadas é obtida uma resposta de deslocamentos do sistema quando o mesmo se encontra em estado estacionário ao ser submetido a uma excitação harmônica. Através deste modo de análise é obtida a resposta em

frequência para um modelo excitado por uma perturbação. Por este motivo, este formato de análise é muito utilizado para encontrar frequências naturais de um sistema analisando as amplitudes da resposta do modelo em diferentes frequências.

Neste trabalho esta modalidade de análise foi utilizada para definir amplitudes e separar modos de propagação em uma chapa. Este procedimento se torna possível ao se considerar uma região de absorção suficientemente grande nas extremidades da chapa, de forma que as perturbações que atingem esta região a partir do centro da chapa são atenuadas e não se refletem nas bordas, impedindo que modos de vibração naturais da estrutura da chapa apareçam na simulação. Desta forma, a resposta obtida apresenta deslocamentos nos elementos da chapa que correspondem a uma mistura dos modos que nela estão se propagando. O que permite separar os modos presentes entre si é o fato de o comprimento de onda de cada um deles ser diferente, de forma que podem ser separados através da aplicação de uma transformada de Fourier espacial na resposta obtida.

Um esquema dos modelos de elementos finitos simulados pode ser visto na Figura 17, onde se pode visualizar a disposição das cerâmicas na base metálica e do conjunto do transdutor na chapa metálica.

Figura 17 – Modelo de Elementos Finitos



O modelo foi gerado utilizando elementos hexaédricos quadráticos de 20 nós com propriedades do material piezoelétrico para representar os movimentos das cerâmicas acopladas na base metálica. A base metálica e a chapa foram modeladas utilizando elementos sólidos hexaédricos lineares de 8 nós. Os acoplamentos entre as cerâmicas e as peças metálicas, foram feitos vinculando-se os nós nas superfícies em contato destas estruturas.

A chapa e o transdutor foram simulados gerando apenas um quadrante do modelo inteiro. Para manter a simetria do modelo foi aplicada uma condição de contorno de anti-simetria nas bordas, não alterando assim o movimento do modo SH_0 nesta região. Esta condição de contorno implica em restringir os deslocamentos em um plano perpendicular à borda, bem como as rotações no eixo normal à este plano. A zona de absorção foi gerada de acordo com a frequência analisada, de forma que seu tamanho fosse o suficiente para atenuar os movimentos que chegassem até a borda e as reflexões não fossem detectadas (RAJAGOPAL, 2012). A chapa simulada possui 2mm de espessura e possui propriedades de aço carbono com massa específica de 7860kg/m^3 , módulo de elasticidade de 210GPa e coeficiente de Poisson de 0,3. As partes metálicas do transdutor foram simuladas com o mesmo material utilizado na chapa. As diferentes dimensões utilizadas nos modelos da chapa em função da faixa de frequências analisada podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões de chapa para os modelos de elementos finitos

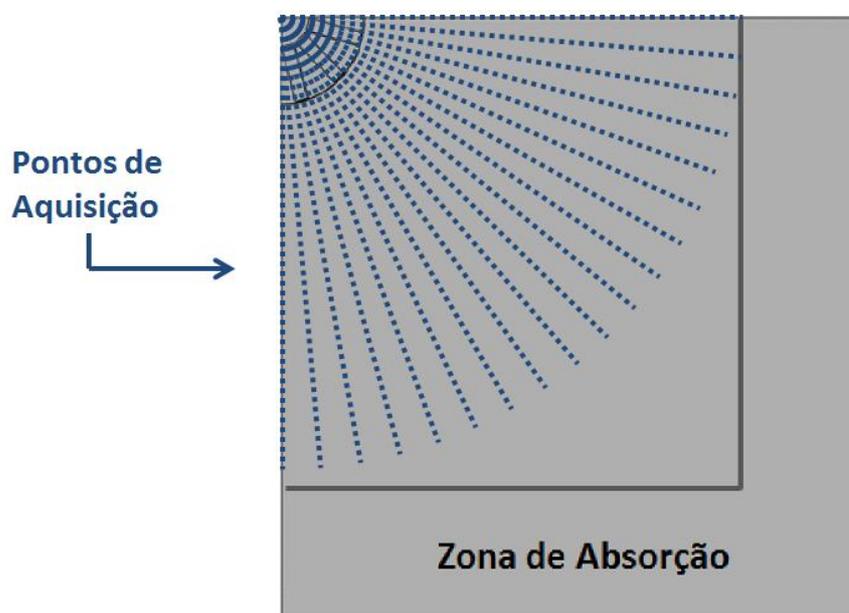
	20-30 kHz	40-150 kHz	160-250 kHz
Dimensões da chapa	300x300 mm	300x300 mm	300x300 mm
Zona de absorção	820 mm	420 mm	40 mm
Dimensões elemento	2x2x1 mm	1x1x1 mm	1x1x1 mm
Elementos chapa	627200	1036800	231200

A faixa de frequências analisada varia de 20kHz até 250kHz, sendo avaliados intervalos entre 10kHz. A excitação aplicada de forma harmônica, para cada frequência analisada, foi uma tensão de 1V entre as faces superior e inferior de cada cerâmica piezoelétrica do arranjo, sendo que todas foram excitadas em fase. Os elementos hexaédricos da chapa possuem aresta de 1mm, com exceção dos modelos para 20 e 30kHz, onde foi necessário aumentar para 2mm as arestas de uma das faces do elemento devido à maior dimensão total da chapa do modelo, por motivos de esforço computacional. Em todas as

frequências analisadas os modelos permitiram que o modo A_0 , que possui o menor comprimento de onda, fosse representado por no mínimo 10 elementos ao se propagar na chapa.

Para gerar os resultados de direcionalidade e amplitude dos modos a partir do resultado das simulações, foram adquiridos os deslocamentos dos nós nas 3 direções através de linhas radiais a cada 5° em um intervalo de 0° a 90° , considerando um comprimento de 300mm na chapa sem entrar na zona de absorção, conforme pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 – Pontos de Aquisição ao longo de direções radiais espaçadas por 5°

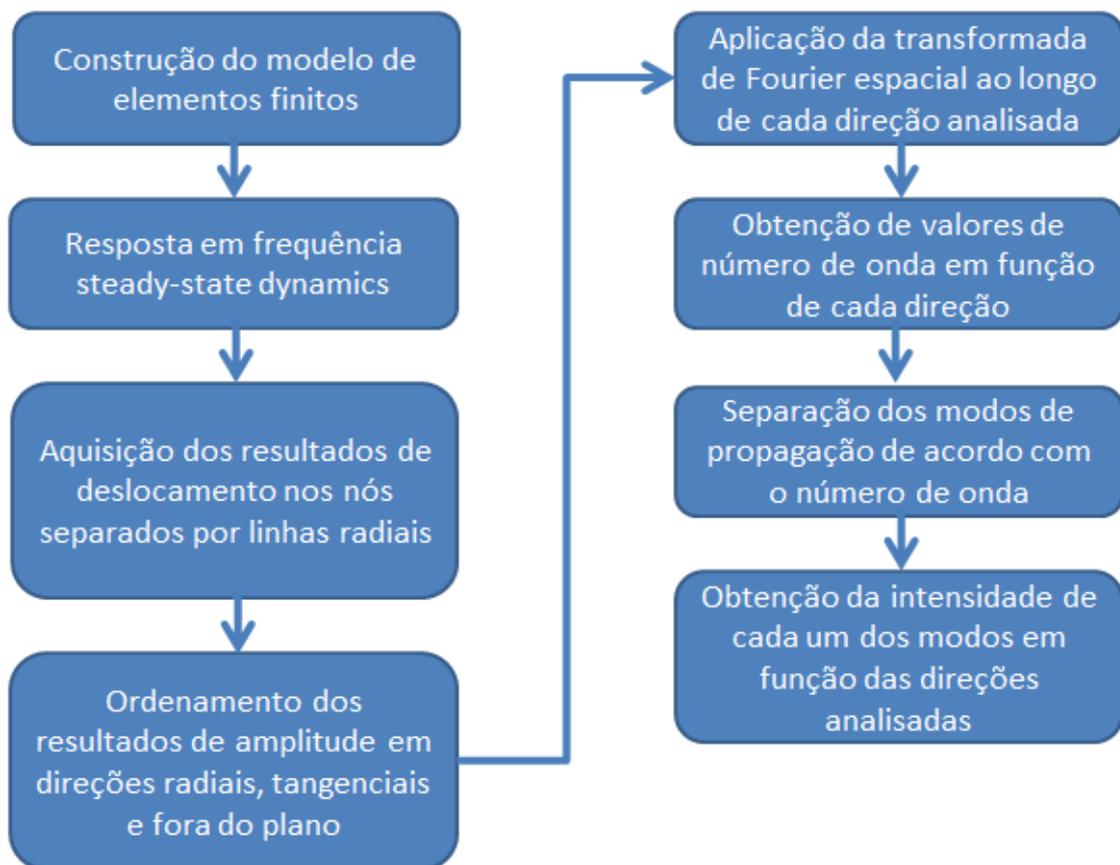


Com estes valores, foi possível separar os modos de propagação através da transformada de Fourier espacial ao longo das linhas indicadas pela Figura 6, obtendo-se assim a amplitude em função do número de onda para cada modo em cada uma das direções. As operações de pós-processamento dos resultados obtidos pela análise numérica foram realizadas através do software Matlab, utilizando a função *fft* (*Fast Fourier Transform*) para realização da transformada de Fourier espacial (MATLAB DOCUMENTATION, 2016). Os números de onda de cada modo na frequência relacionada foram obtidos através das curvas de dispersão geradas para a chapa de aço pelo software Disperse. Devido às características dos movimentos de cada um dos modos fundamentais considerados ao longo de cada direção, a amplitude dos mesmos foi obtida pelo seguinte critério: a indicação do modo S_0 foi feita

através dos deslocamentos radiais no plano médio da chapa, coincidentes com o respectivo número de onda deste modo, a indicação do modo SH_0 foi feita através dos deslocamentos tangenciais no plano médio da chapa, coincidentes com o número de onda do modo SH_0 e a indicação do modo A_0 foi feita através dos deslocamentos fora do plano no plano médio da chapa, coincidentes com o número de onda do modo A_0 .

O processo de geração das amplitudes para cada modo de propagação a partir das simulações numéricas pode ser visto no esquema da Figura 19, onde é mostrada a ordem de cada etapa realizada.

Figura 19 – Procedimento para geração de resultados



3.3 Ensaio Experimental

Para validar as análises numéricas foi realizada a construção de dois diferentes modelos do transdutor. Os modelos construídos possuem diferentes características, detalhadas nas subseções seguintes.

3.3.1 Modelo 1

O primeiro modelo testado possui os parâmetros presentes na Tabela 4.

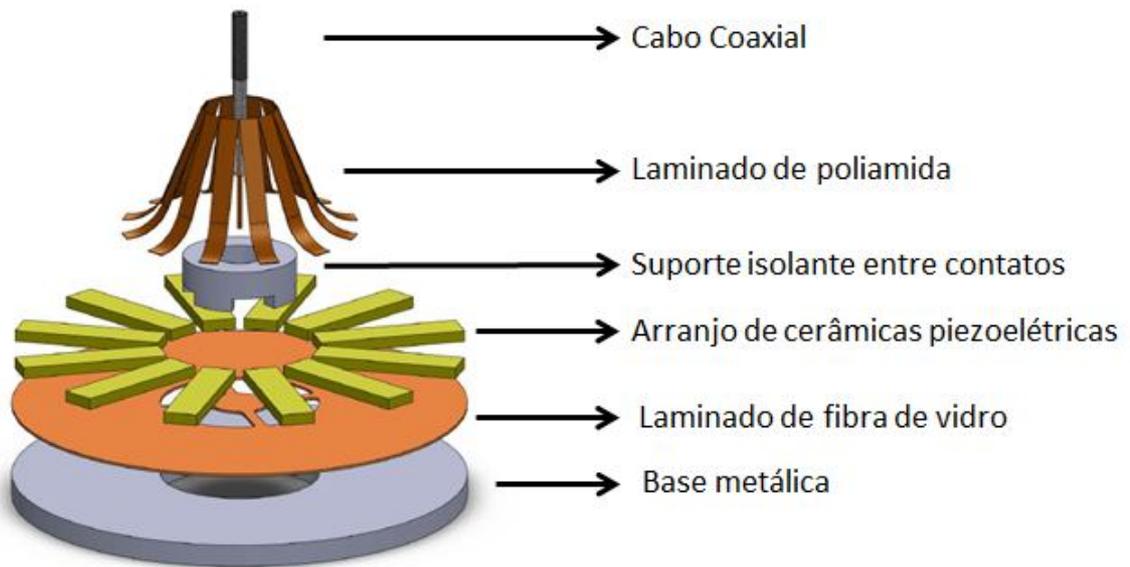
Tabela 4 – Parâmetros utilizados na construção do transdutor Modelo 1

Parâmetros	Medida
d_i	14 mm
W	3 mm
H	1 mm
L	13 mm
E_b	2 mm
N	12 un.
E_s	-

A base metálica foi construída utilizando aço carbono ASTM A36, os contatos elétricos foram realizados na face inferior das cerâmicas através de um material laminado utilizado na fabricação de PCB (*Printed Circuit Board*) flexível, posicionado entre a base metálica e a cerâmica piezoelétrica. Este material é composto por uma camada de compósito de fibra de vidro e resina epóxi de 0,2mm de espessura e uma camada de cobre de 17,5 μm (INTERPLAY, 2017). Na parte superior do arranjo os contatos foram feitos utilizando tiras de Pyralux® (DUPONT, 2017), material laminado feito de poliamida e cobre, as quais foram soldadas na face superior das cerâmicas.

Na parte central, sobre a peça de laminado de fibra de vidro, foi posicionada uma peça em ABS que serviu como isolante entre os contatos superiores e inferiores do conjunto, além de servir como suporte para o cabo coaxial utilizado para transmissão do sinal até o transdutor. Nesta configuração todas as cerâmicas são excitadas em fase. A vista explodida desta configuração pode ser vista na Figura 20.

Figura 20 – Configuração do transdutor Modelo 1



Em modelos preliminares, foi testada a fixação dos elementos piezoelétricos no laminado de fibra de vidro utilizando adesivo epóxi, entretanto este método de montagem não se mostrou totalmente eficiente, sendo necessária a fixação individual de cada componente para uma correta colagem, dificultando o processo de posicionamento das cerâmicas. Para contornar este problema, a fixação dos elementos piezoelétricos no laminado de fibra de vidro foi realizada através da utilização de uma solda em pasta de composição 63Sn/37Pb. A soldagem foi feita levando o conjunto posicionado ao forno durante 2 minutos em uma temperatura de 210°C. A fixação do laminado de fibra de vidro na base metálica foi feita utilizando adesivo epóxi. Na Figura 21 e na Figura 22 podem-se visualizar as etapas da construção do transdutor.

Figura 21 – Etapas de soldagem das cerâmicas no laminado de fibra de vidro. (a) Posicionamento das cerâmicas (b) Fixação do conjunto (c) Soldagem em temperatura controlada

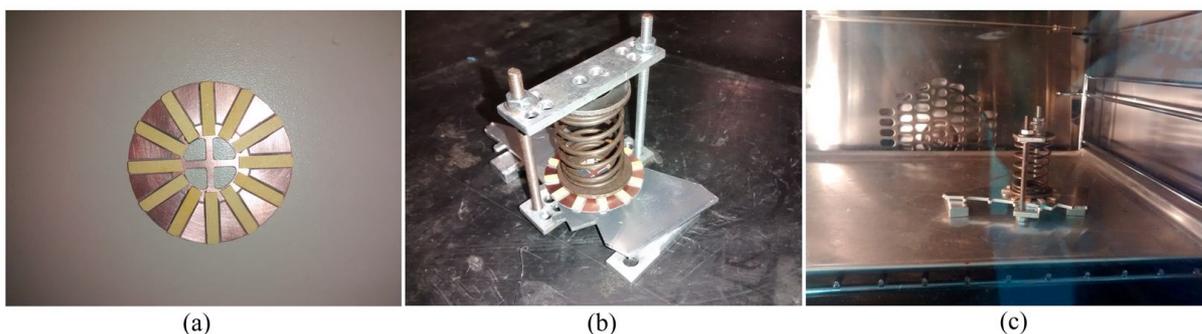
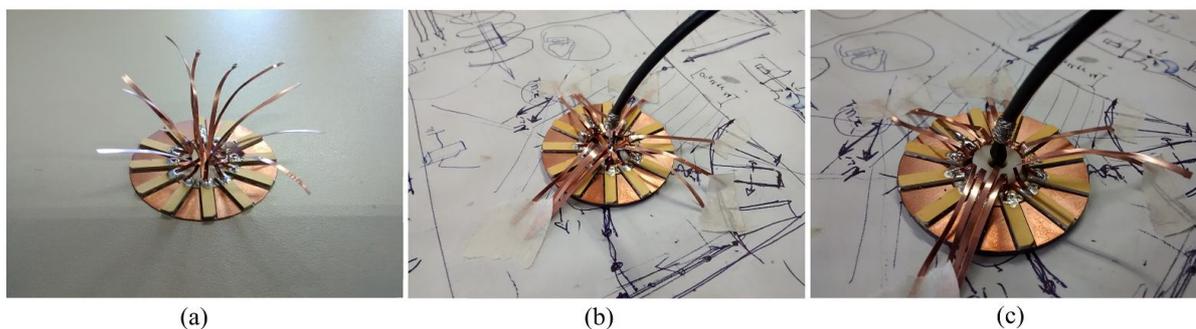
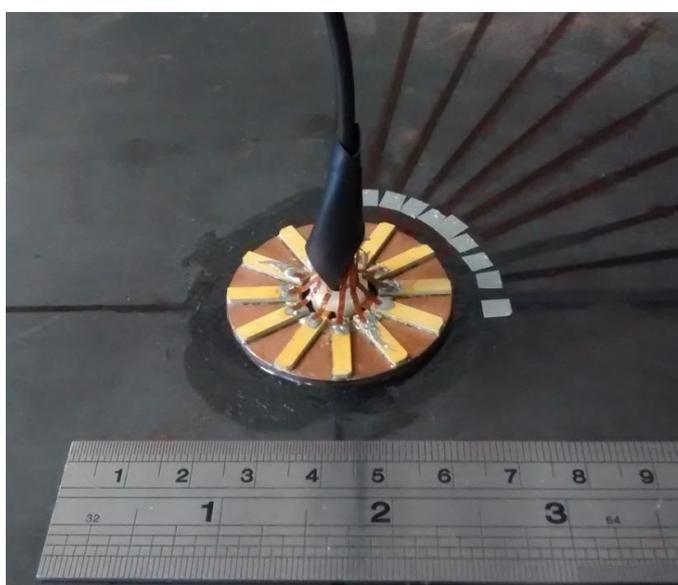


Figura 22 – Etapas de soldagem posteriores. (a) Soldagem das tiras de Pyralux® (b) Soldagem do conector central do cabo coaxial (c) Isolamento do contato central para soldagem da malha externa



O modelo construído foi fixado utilizando adesivo epóxi em chapa de aço carbono ASTM-A-36 de 2mm, com dimensões de 1000x1000mm. O conjunto construído e fixado na chapa pode ser visualizado na Figura 23.

Figura 23 – Transdutor Modelo 1 instalado



3.3.2 Modelo 2

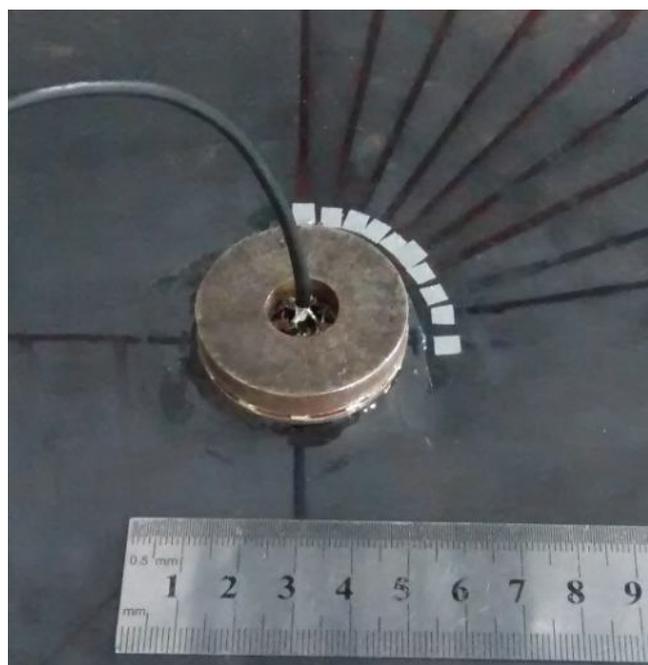
O Modelo 2 foi construído com as mesmas características do Modelo 1, e difere apenas na presença da massa metálica fixada na parte superior. Os parâmetros utilizados podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados na construção do transdutor Modelo 2

Parâmetros	Medida
d_i	14 mm
W	3 mm
H	1 mm
L	13 mm
E_b	2 mm
N	12 un.
E_s	6,35 mm

A fixação dos elementos piezoelétricos na parte superior foi realizada da mesma forma que na parte inferior, soldando diretamente em uma peça circular fabricada com o laminado de fibra de vidro. As fixações da base metálica e da massa metálica nos laminados de fibra de vidro foram feitas utilizando adesivo epóxi. O conjunto construído e fixado na chapa pode ser visualizado na Figura 24.

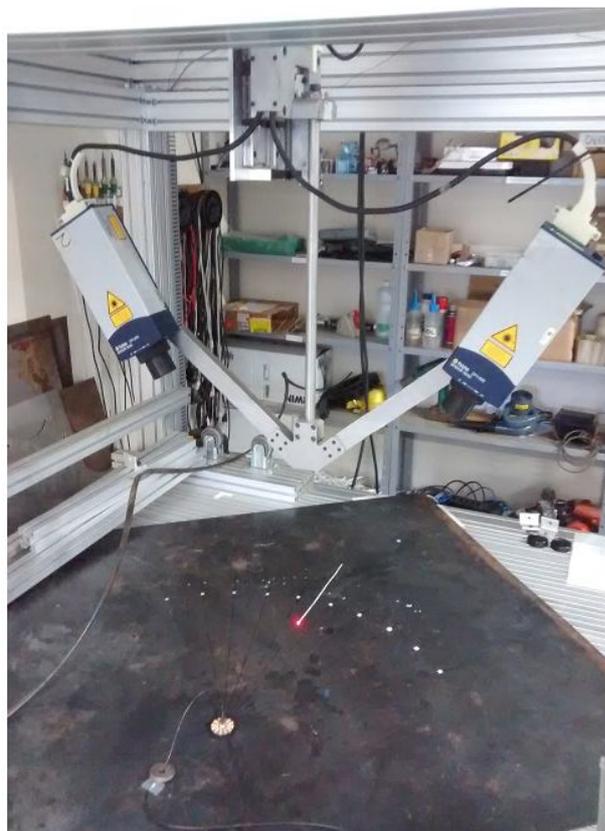
Figura 24 – Transdutor Modelo 2 instalado



3.3.3 Configurações do ensaio

As medidas realizadas com os dois modelos de transdutores foram executadas no mesmo formato. A excitação do transdutor foi realizada utilizando um sinal Toneburst de 5 ciclos (ou seja, um sinal senoidal ao qual foi aplicado uma janela Hanning) com frequências centrais variando de uma faixa de 10 até 200kHz, em intervalos de 10kHz. O sinal recebido pelo transdutor foi gerado através de um sistema de geração de sinais com placa National Instruments PXI-5422 e amplificado por uma fonte Krohn-Hite modelo 7500 que forneceu um sinal com 100V de pico a pico ao transdutor. Os deslocamentos gerados na chapa pelo transdutor foram medidos utilizando dois vibrômetros por efeito laser-doppler Polytec OFV-505 (utilizando módulo controlador Polytec OFV-5000), posicionados em um ângulo de 30° em relação à vertical, detectando desta forma, deslocamento fora do plano e no plano da chapa. Os sinais medidos com o sistema de vibrômetros foram adquiridos utilizando sistema de aquisição com placa National Instruments PXI-5105. A configuração da bancada pode ser vista na Figura 25.

Figura 25 – Configuração da bancada



Nas medições realizadas com frequência central entre 10 e 80kHz o vibrômetro foi configurado para operar com uma sensibilidade de 5mm/s/V (para operação até 100kHz) e para as frequências entre 90 e 200kHz foi utilizada uma sensibilidade de 10mm/s/V (para operação até 250kHz). A medida de velocidade de vibração obtida diretamente pelo sistema de vibrômetros necessita passar por uma integração no processo de pós-processamento para que sejam obtidos valores de deslocamento. O computador utilizado para geração dos sinais, a fonte utilizada para amplificar o sinal e o módulo controlador do vibrômetro são mostrados na Figura 26. O esquema de ligação entre os equipamentos utilizados para a aquisição dos sinais pode ser visto na Figura 27.

Figura 26 – Equipamentos utilizados. (a) Sistema de geração e aquisição de sinais (b) Fonte amplificadora (c) Módulos de controle dos vibrômetros

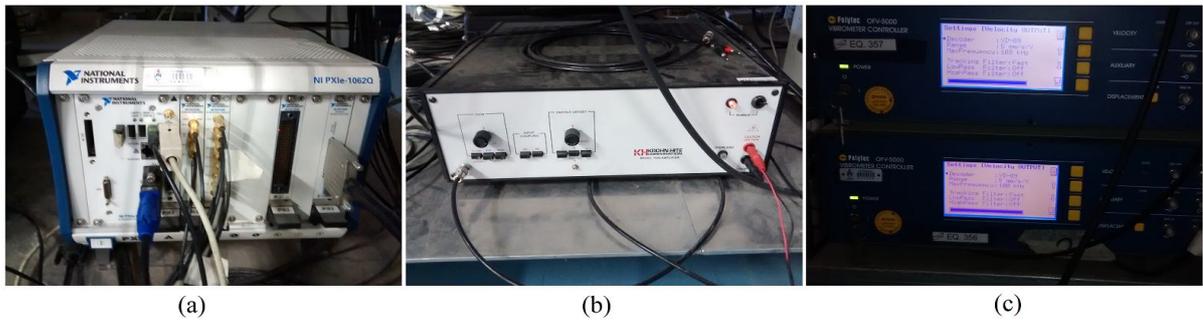
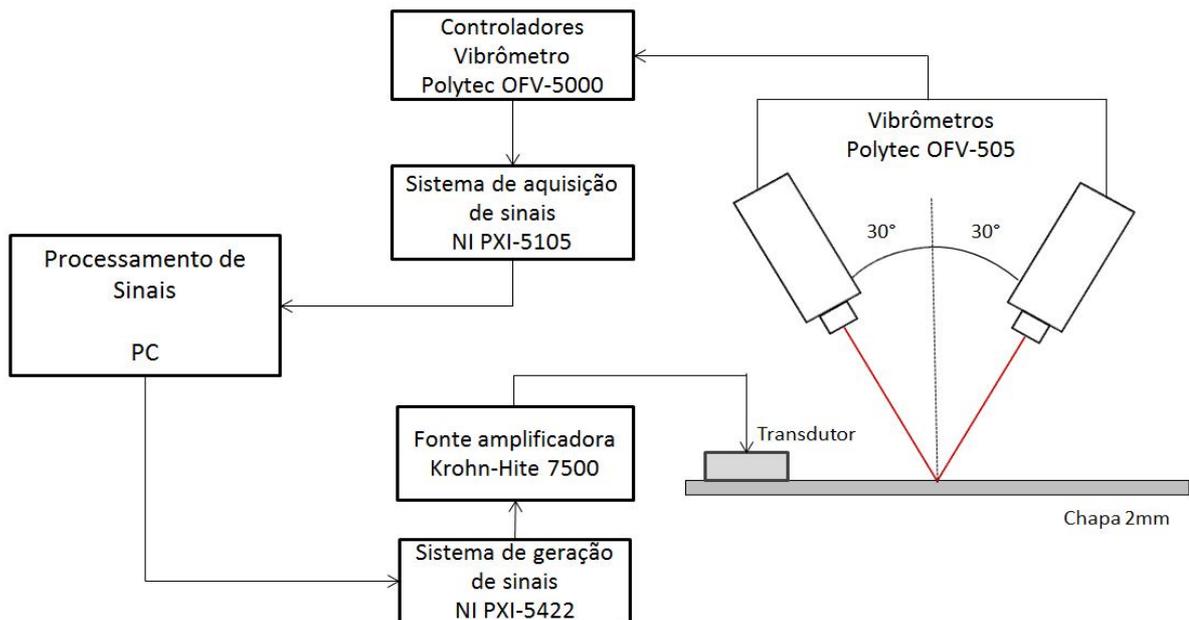
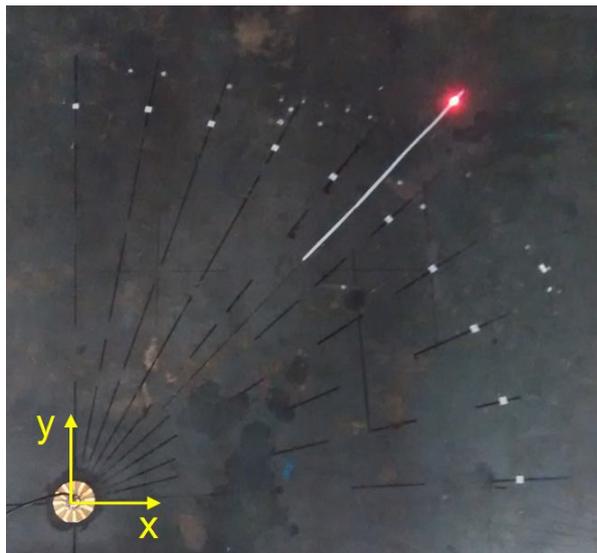


Figura 27 – Diagrama de configuração do procedimento experimental



Para realizar a avaliação dos modos emitidos pelo transdutor em cada direção na chapa de aço foram coletados pontos a 45cm do transdutor, dispostos em intervalos de 10° ao longo de 0° a 90° . Na Figura 28 pode-se visualizar a disposição dos pontos avaliados, onde foi medida a velocidade na superfície da chapa através dos vibrômetros.

Figura 28 – Configuração dos pontos medidos



Para cada ponto coletado, a posição dos interferômetros foi orientada tanto em 0° como em 90° , de forma que as medidas no plano fornecessem informação a respeito de deslocamentos no eixo x e no eixo y da chapa. Estes valores serviram de base para avaliar a omnidirecionalidade dos modos fundamentais que se propagaram durante o ensaio.

Também foram realizadas aquisições com os interferômetros ao longo de um intervalo de 280mm radialmente em relação ao transdutor, com a aquisição de 141 pontos espaçados por 2mm neste intervalo. Estas aquisições foram feitas com os vibrômetros orientados radialmente, para detecção do modo S_0 , e tangencialmente, para detecção do modo SH_0 . Na Figura 28 pode-se visualizar este intervalo localizado em um ângulo de 45° . Com estas medidas foi possível realizar a transformada de Fourier espacial (ALLEYNE, CAWLEY, 1991) e verificar os modos propagando naquela direção através das curvas de dispersão.

O experimento para mensurar a intensidade e a direcionalidade da recepção do transdutor frente ao modo SH_0 foi realizado com a utilização de um cristal piezoelétrico acoplado a uma massa metálica. Este sistema com resposta conhecida emite o modo SH_0 em uma direção e os modos S_0 e A_0 na direção perpendicular. O acoplamento deste transdutor foi

feito na chapa de teste através do auxílio de uma estrutura em ABS e ímãs permanentes. O sistema utilizado e a sua resposta podem ser visualizados na Figura 29 e 30, respectivamente.

Figura 29 – Sistema piezoelétrico utilizado no teste de recepção do transdutor

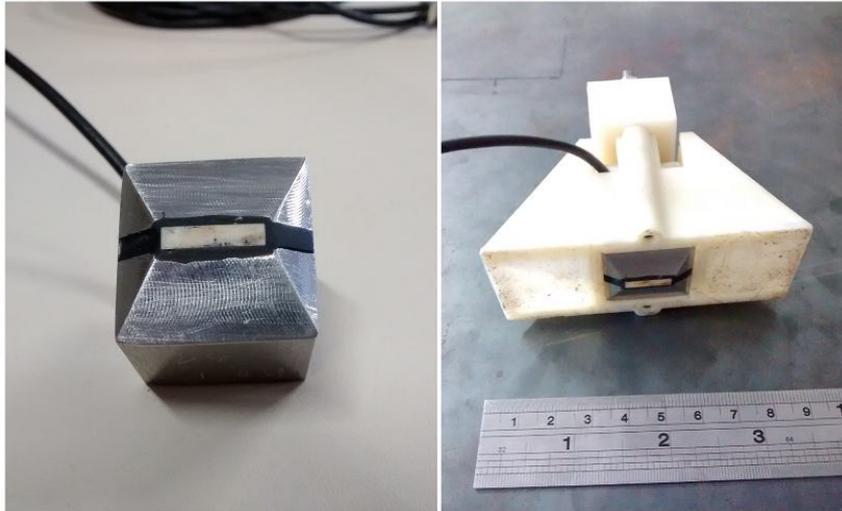
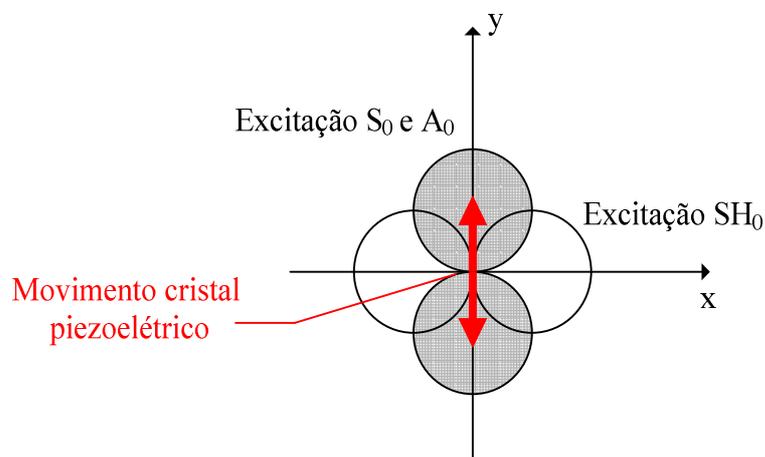


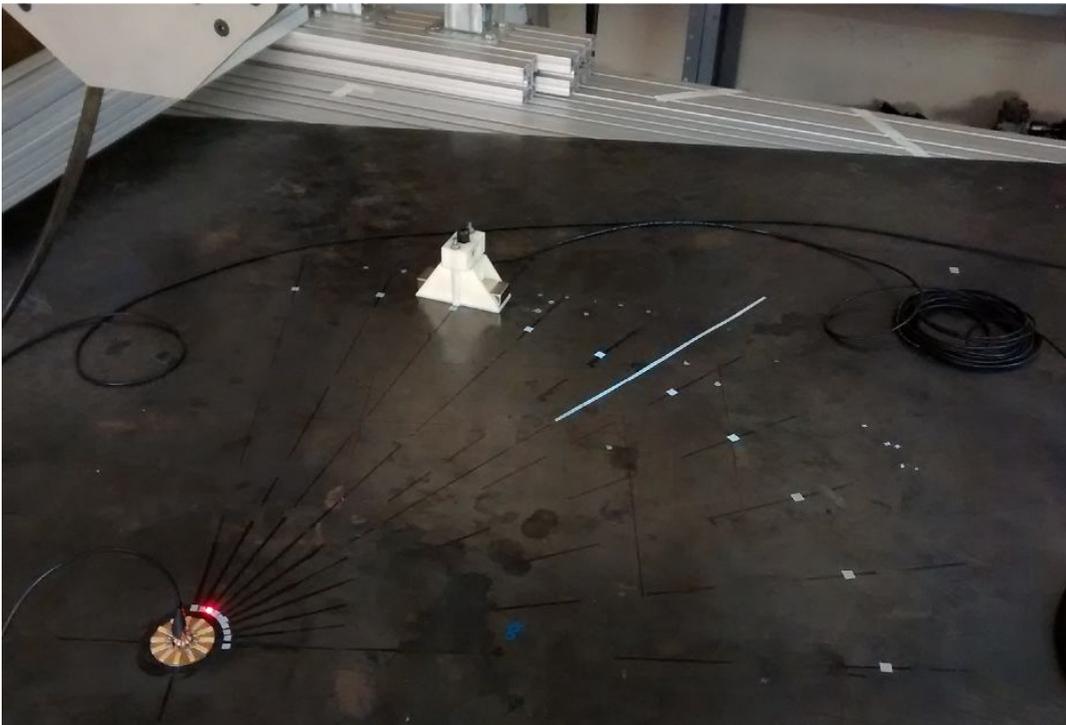
Figura 30 – Característica da resposta angular do sistema piezoelétrico



O sistema foi posicionado de modo a emitir o modo SH_0 na direção do transdutor, a 46cm de distância, variando a sua posição de 0° a 90° em intervalos 10° . A partir da amplitude do modo SH_0 detectado, identificado a partir do seu tempo de chegada até o transdutor, foi possível avaliar a amplitude da resposta da recepção do transdutor em relação à distribuição angular e em relação à frequência de trabalho.

Como o sistema piezoelétrico utilizado na emissão pode apresentar variações de acordo com o seu acoplamento na chapa, foi utilizado o conjunto de vibrômetros posicionado juntamente ao transdutor, orientado transversalmente à direção de emissão do modo SH_0 . Nesta posição foram obtidas as amplitudes referentes ao modo SH_0 , utilizadas para normalizar a resposta do transdutor de acordo com a intensidade da emissão em cada direção. Na Figura 31 podem ser visualizados o posicionamento do sistema piezoelétrico e a localização dos pontos de aquisição do vibrômetro.

Figura 31 – Configuração do ensaio de amplitude de recepção do transdutor



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

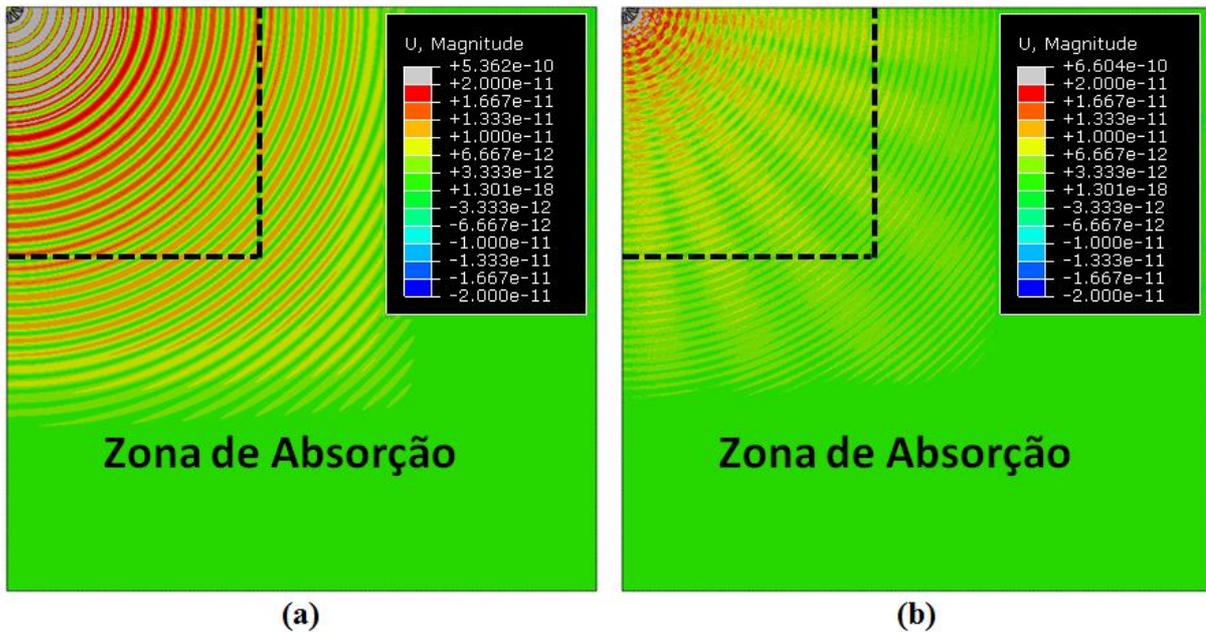
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Inicialmente são apresentados os resultados obtidos pelos modelos numéricos, avaliando a influência do número de cerâmicas, do comprimento das cerâmicas e da espessura da base do transdutor na amplitude e distorção dos modos emitidos. É avaliada também a influência da adição de uma massa metálica na parte superior do transdutor. Em seguida são apresentados os resultados obtidos com os modelos experimentais construídos, avaliando os modos emitidos em uma chapa, a amplitude e direcionalidade destes modos, a amplitude e direcionalidade do sinal recebido pelos transdutores ao receberem o modo SH_0 e a distorção da distribuição angular das amplitudes dos sinais emitidos e recebidos pelos transdutores.

4.1 Simulações por Elementos Finitos

Os valores obtidos através das simulações por elementos finitos representam os deslocamentos presentes na malha do modelo em cada frequência analisada. Devido à presença da zona de absorção na chapa do modelo, as perturbações geradas na estrutura pela excitação harmônica das cerâmicas piezoelétricas não atingem as bordas da chapa, impedindo que a estrutura da chapa apresente condições de ressonância frente à determinada frequência harmônica de excitação. Caso estas ressonâncias estivessem presentes na simulação, os resultados apresentariam deslocamentos referentes aos modos de vibração da estrutura da chapa. Este fato acabaria dificultando ou mesmo impossibilitando a separação dos modos de propagação emitidos através do número de onda de cada um dos mesmos.

Como exemplo dos resultados gerados pela análise de resposta em frequência feita, podem ser vistos na Figura 32 os resultados da magnitude dos deslocamentos para 90kHz e 140kHz. Estes resultados são referentes ao transdutor com cerâmica piezoelétrica de 13mm e espessura da base metálica com 1mm.

Figura 32 – Magnitude dos deslocamentos (a) 90kHz (b) 140kHz



Na resposta em 90kHz pode-se constatar que os deslocamentos apresentam um comportamento mais uniforme até atingir a zona de absorção do que os deslocamentos na chapa em 140kHz. Esta característica indica que em 140kHz pode existir mais de um modo com amplitudes semelhantes se propagando. Para fazer a separação dos modos foi feita a transformada de Fourier espacial ao longo de direções radiais na placa, desta forma é possível apresentar as amplitudes em função dos ângulos e dos números de onda. Nas Figuras 33 e 34 identificam-se, respectivamente, as maiores amplitudes de deslocamento para as frequências de 90 e 140kHz descritas no plano k por ângulo de propagação. As imagens foram separadas em duas para a visualização dos deslocamentos fora do plano, que correspondem ao modo A_0 , e tangenciais às direções radiais, que correspondem ao modo SH_0 . Estes deslocamentos são referentes aos nós que se encontram na metade da espessura da chapa.

Pode-se notar que os números de onda k dos maiores deslocamentos ao longo dos ângulos correspondem com os números de onda retirados do software Disperse para estas frequências, indicados nas Figuras 33(c) e 34(c). No caso das amplitudes referentes aos deslocamentos tangenciais no plano, o número de onda coincidiu com o número de onda referente ao modo SH_0 nestas frequências. Para os deslocamentos fora do plano, o número de onda das maiores amplitudes teve um pequeno desvio em relação ao número de onda do modo A_0 retirado do Disperse, como pode ser visto nas Figuras 33 e 34.

Figura 33 – Números de onda 90kHz (a) Tangenciais no plano (b) Fora do plano (c) Curvas de dispersão para chapa de aço com espessura 2mm

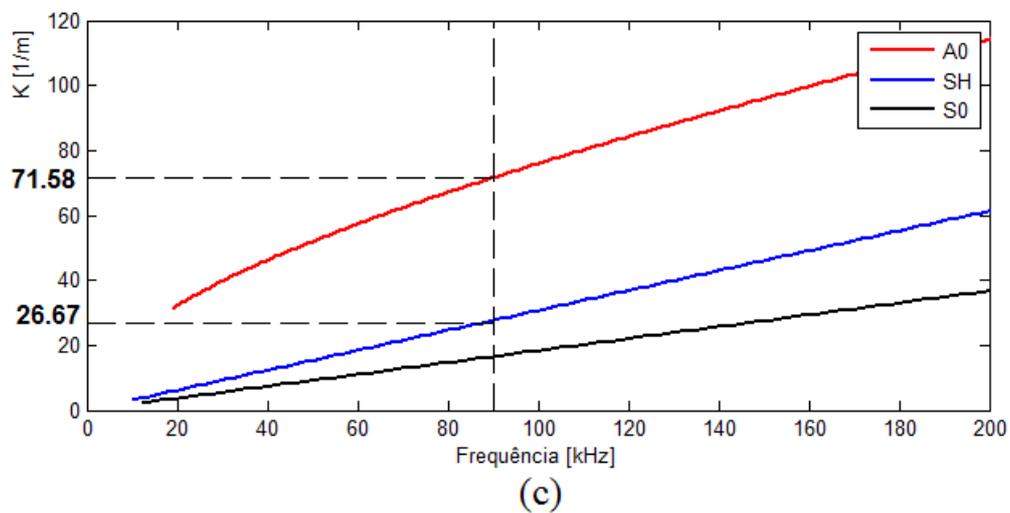
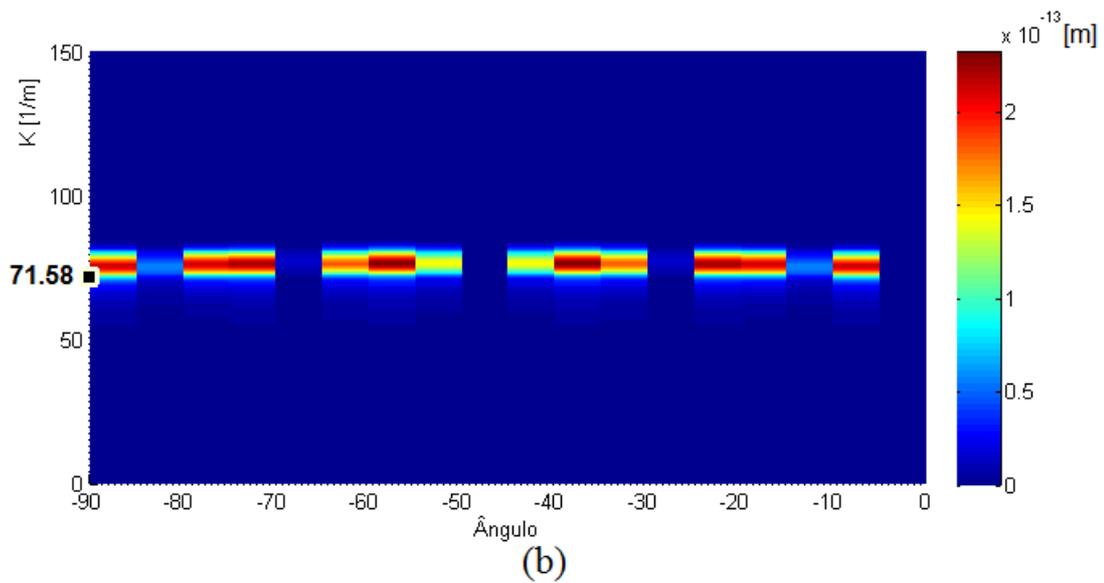
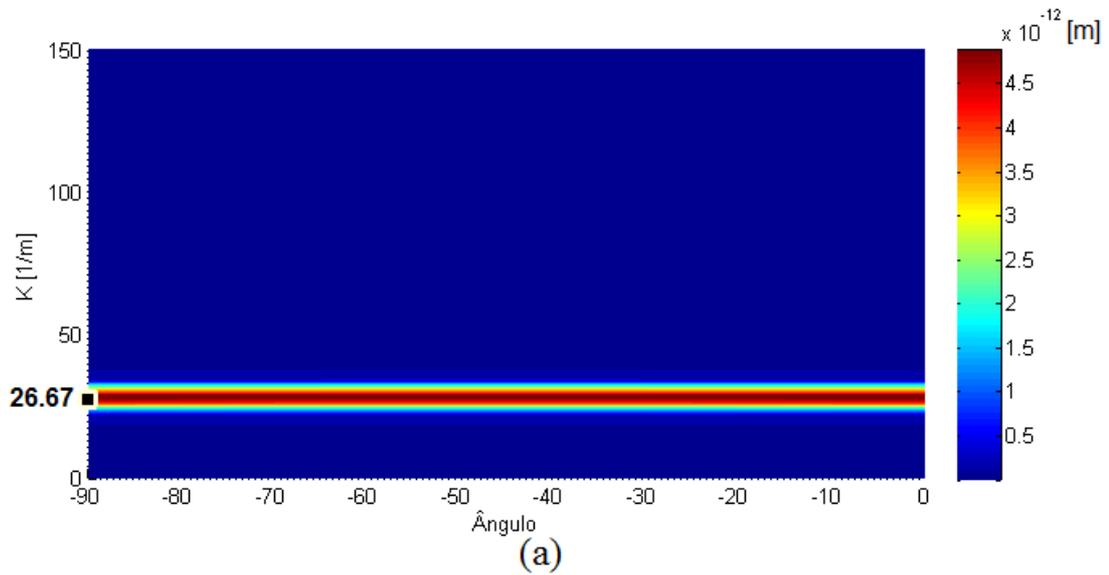
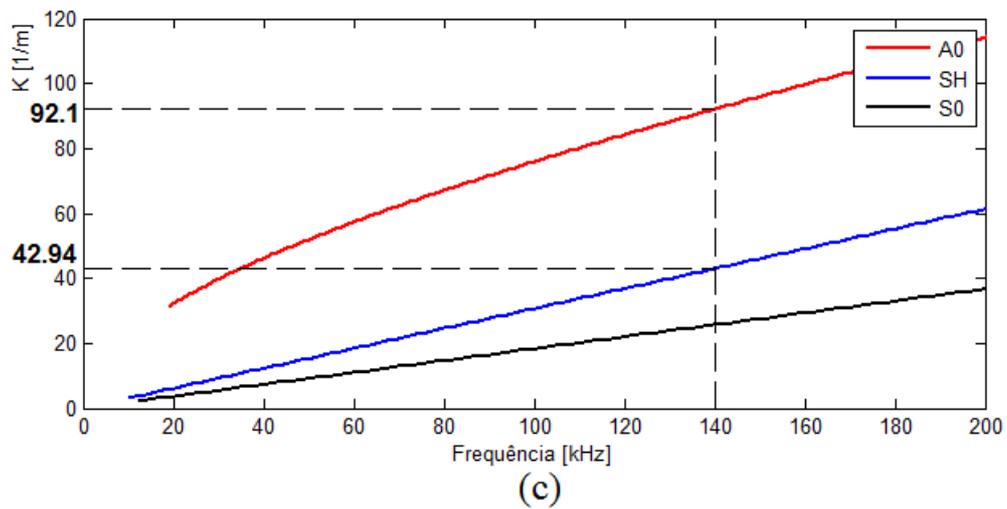
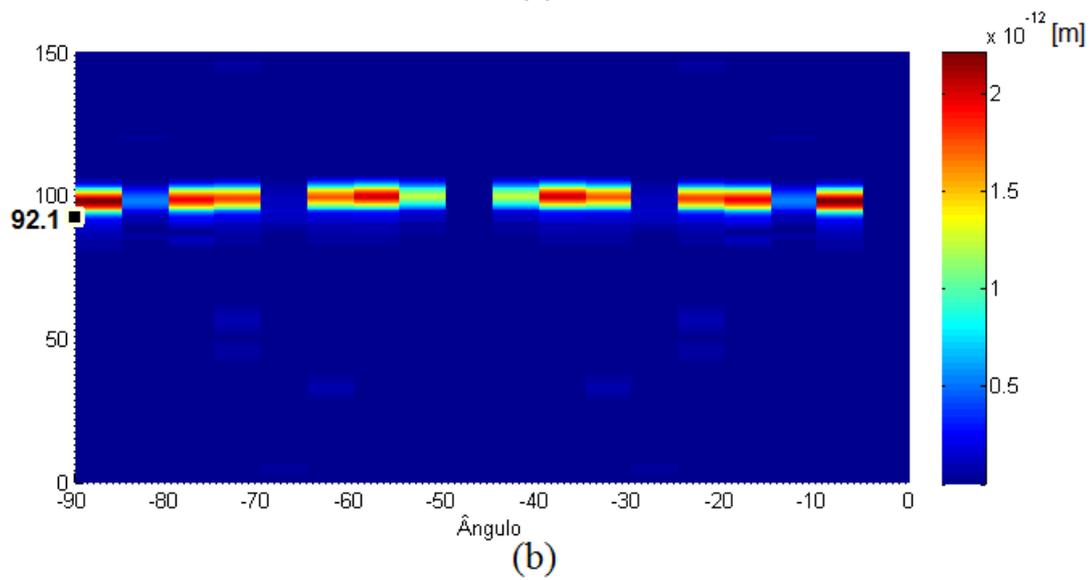
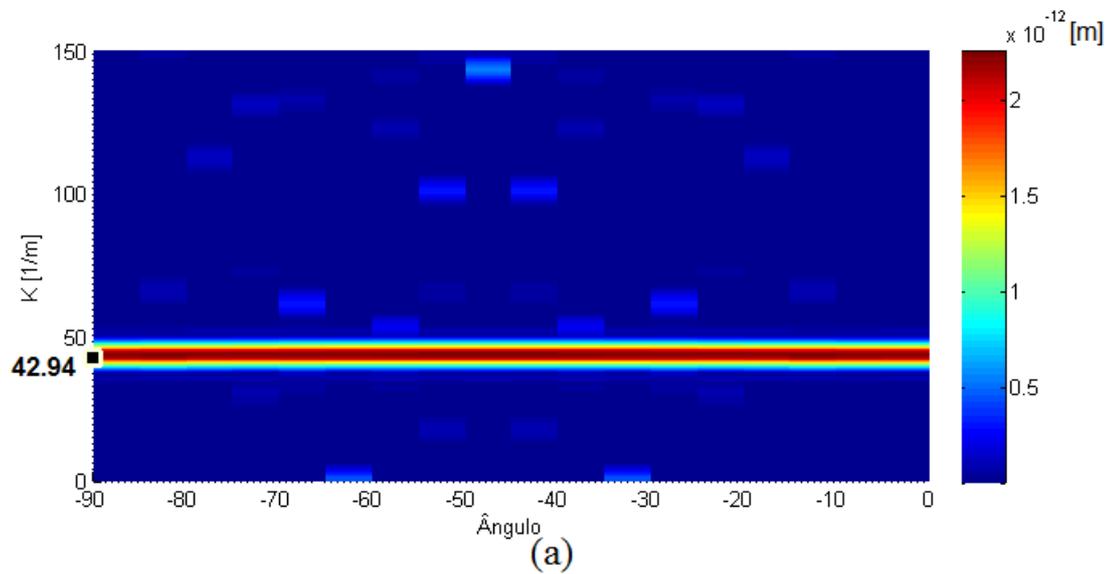
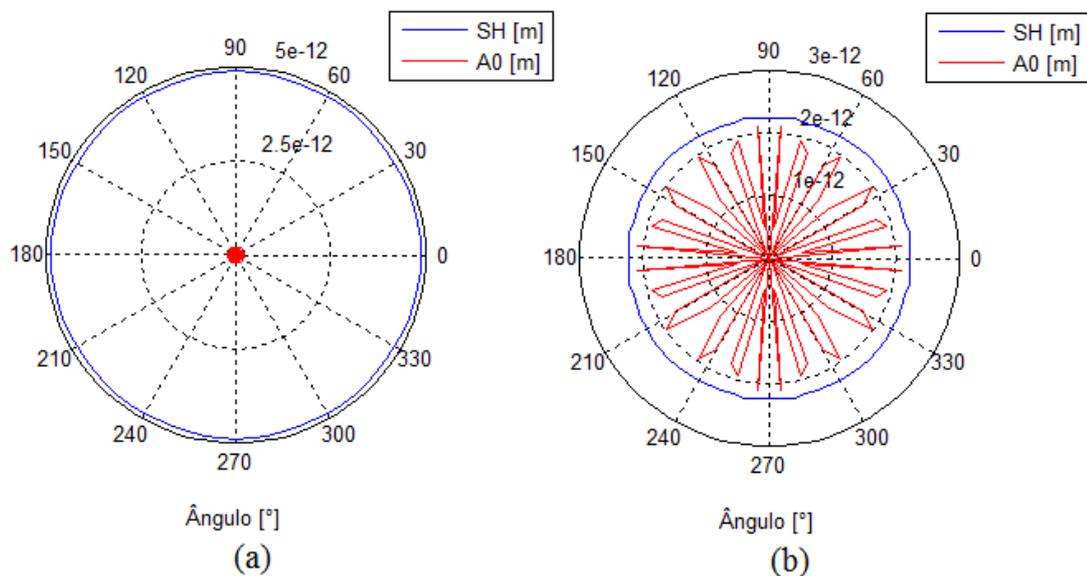


Figura 34 - Números de onda 140kHz (a) Tangenciais no plano (b) Fora do plano (c) Curvas de dispersão para chapa de aço com espessura 2mm



Tomando os valores máximos apresentados na simulação e considerando que estes movimentos representam os modos de propagação coincidentes com os números de onda, foi possível gerar os gráficos de direcionalidade dos modos SH_0 e A_0 para cada uma das análises. O modo S_0 também foi verificado examinando-se os deslocamentos radiais, porém as simulações não apresentaram amplitudes altas o suficiente para que este modo pudesse ser mensurado. A Figura 35 apresenta os gráficos de direcionalidade dos modos SH_0 e A_0 para 90 e 140kHz.

Figura 35 – Direcionalidade dos modos SH_0 e A_0 (a) 90kHz (b) 140kHz



Em 90kHz pode-se observar que o modo SH_0 apresenta maiores amplitudes do que o modo A_0 , comprovando o que demonstra a Figura 6.a, que mostra um modo uniforme ao longo da chapa. No caso de 140kHz, nota-se que os dois modos têm amplitudes próximas, demonstrando que nesta frequência o sinal do modo SH_0 emitido sofreria maior interferência devido à maior amplitude do sinal de modo A_0 emitido. Em ambos os casos o modo SH_0 apresentou uma boa omnidirecionalidade, necessária no desenvolvimento deste transdutor. O modo A_0 apresentou uma distribuição não uniforme, esse padrão pode ter sido gerado devido à característica do movimento em cada cerâmica, que, se analisada de forma individual, gera um movimento fora do plano na estrutura à sua frente. Como existem espaços da base não preenchidos por material piezoelétrico, esse movimento é transmitido para a chapa.

Simulações semelhantes à apresentada - resposta ao transdutor em 90 e 140kHz - foram realizadas para os demais casos, entre 20 e 200kHz. Os resultados obtidos estão

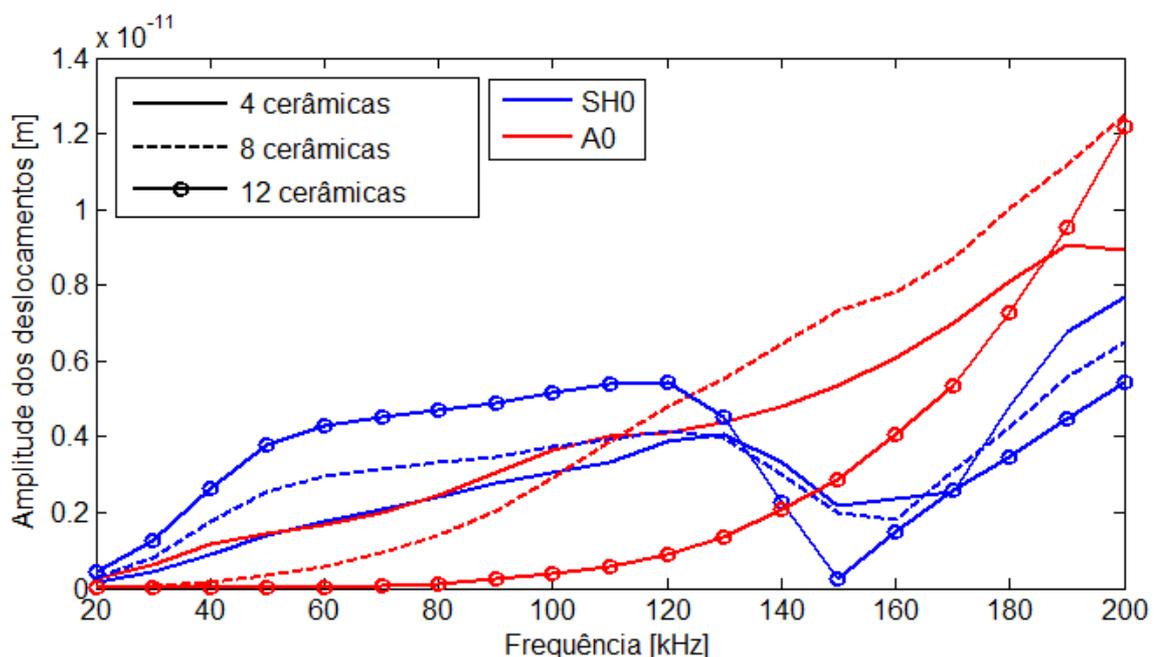
separados para comparação inicialmente pela análise da influência do número de cerâmicas piezoelétricas. Nas subseções seguintes são apresentados os resultados referentes à avaliação da influência do comprimento das cerâmicas e da espessura da base, em seguida é avaliada a influência de uma massa metálica fixada na parte superior do transdutor.

4.1.1 Efeito do número de cerâmicas piezoelétricas

No estudo do número de cerâmicas piezoelétricas, o comprimento das cerâmicas foi fixado em 13mm e a espessura da base metálica em 1mm. Com estas características foram simulados transdutores com 4, 8 e 12 cerâmicas piezoelétricas distribuídas de forma equidistante pela base. O gráfico das amplitudes dos modos de propagação para estes casos pode ser visto na Figura 36, considerando uma faixa de frequências de 20 a 200kHz.

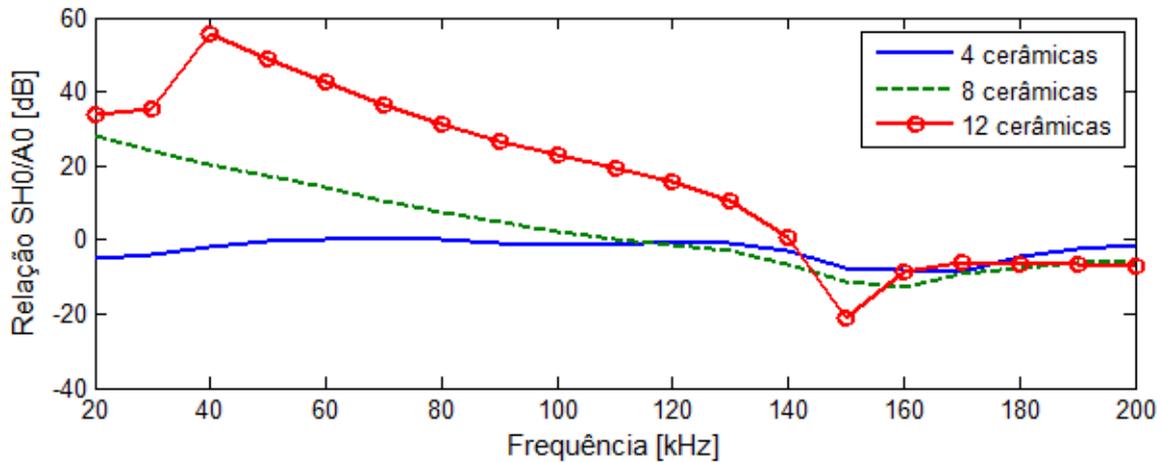
Nesta comparação é possível ver que até 130kHz a amplitude do modo SH_0 é maior quanto maior for o número de cerâmicas. Em 150kHz ocorre uma diminuição do modo SH_0 , acentuada no caso de 12 cerâmicas. O modo A_0 apresentou um comportamento onde a sua amplitude é maior de acordo com o menor número de cerâmicas considerando uma faixa até 110kHz. Esta característica pode ser explicada novamente pelos movimentos fora do plano gerados pela cerâmica, quanto menor o espaço entre as cerâmicas, mais estes movimentos serão anulados pelo elemento piezoelétrico sucessivo.

Figura 36 – Comparação entre número de cerâmicas



Na Figura 37 é apresentada a relação de SH_0/A_0 para 4, 8 e 12 cerâmicas, onde pode ser notado com maior clareza em quais frequências o modo SH_0 é predominante.

Figura 37 – Relação SH_0/A_0 para 4, 8 e 12 cerâmicas piezoelétricas



Nestas curvas pode-se observar que até 120kHz se obtém uma relação de pelo menos 20dB entre os modos SH_0 e A_0 utilizando 12 cerâmicas. Com 8 cerâmicas essa relação já é mais baixa, apresentando valores acima de 10dB apenas em frequências menores que 70kHz. No caso da utilização de 4 cerâmicas, percebe-se que em boa parte das frequências analisadas o modo A_0 é superior ao modo SH_0 , o que não é interessante para um transdutor com base na propagação do modo SH_0 . Pode-se considerar que quanto mais alta a relação entre os modos, melhores serão as condições para operação, sendo interessante utilizar uma relação acima de 10dB para minimizar a amplitude de sinais gerados por modos indesejados. Esta análise inicial permitiu fixar o número de cerâmicas em 12, já que desta forma foram obtidos os melhores resultados em uma faixa de frequências até 120kHz.

4.1.2 Efeito do comprimento das cerâmicas piezoelétricas e da base metálica

Para cada um dos comprimentos de cerâmicas e espessuras de base citados na Tabela 2 foram levantadas as amplitudes do modo SH_0 e A_0 em função da frequência. Nas Figuras 38, 39 e 40 pode-se ver as amplitudes dos modos para cada espessura da base metálica nos três comprimentos de cerâmica analisados, considerando uma faixa de frequências entre 20 e 250kHz. Os resultados obtidos para as três diferentes dimensões de comprimento de cerâmica demonstram uma tendência que se repetiu em todos os casos, com o modo SH_0 apresentando

um crescimento até atingir um ponto de mínimo de amplitude. Este comportamento ocorreu em um intervalo de frequências menores de acordo com o crescimento da cerâmica. Percebe-se que o aumento da amplitude do modo A_0 esta relacionado com o aumento da frequência de excitação, o que também ocorreu em frequência menores de acordo com o aumento do comprimento da cerâmica.

Figura 38 – Amplitudes para cerâmica piezoelétrica 3mm

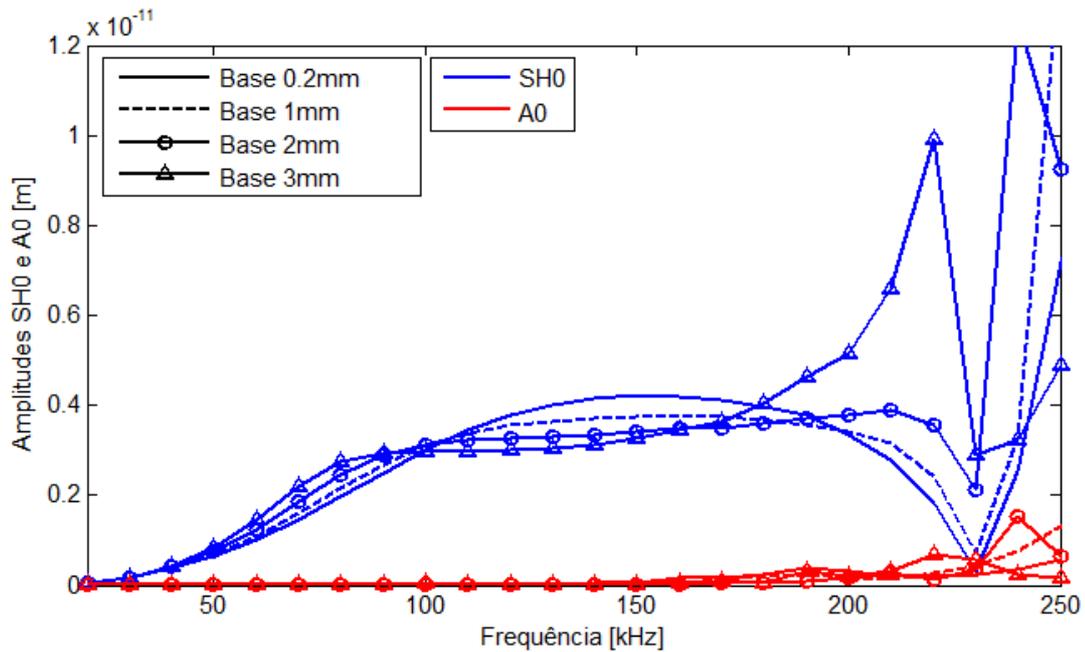


Figura 39 - Amplitudes para cerâmica piezoelétrica 13mm

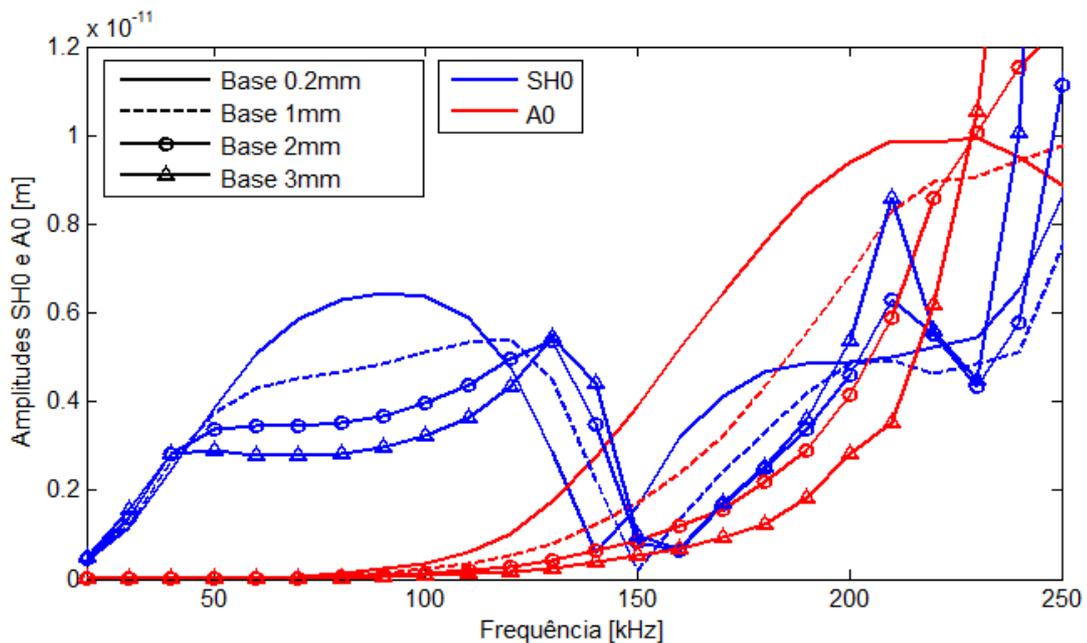
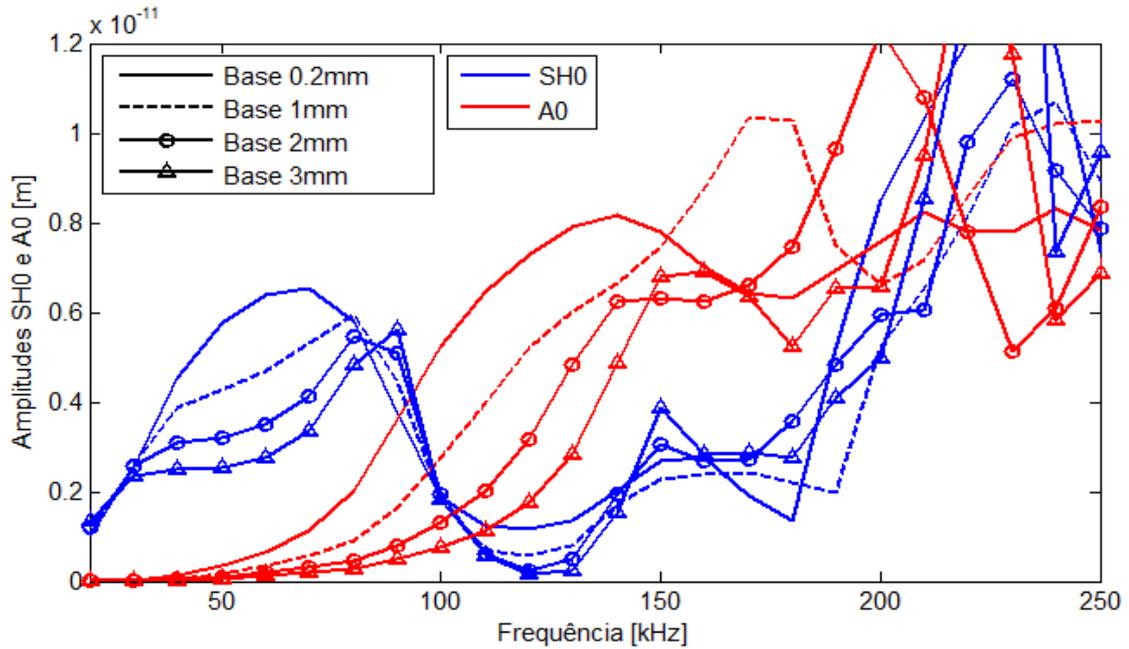


Figura 40 - Amplitudes para cerâmica piezoelétrica 23mm



Para melhor visualização da faixa de frequências que o transdutor opera com uma maior amplitude do modo SH₀ em relação ao modo A₀ foram gerados os gráficos da relação entre estes modos. As Figuras 41, 42 e 43 apresentam a relação de SH₀/A₀ em decibéis para as análises com cerâmicas de 3, 13 e 23mm respectivamente.

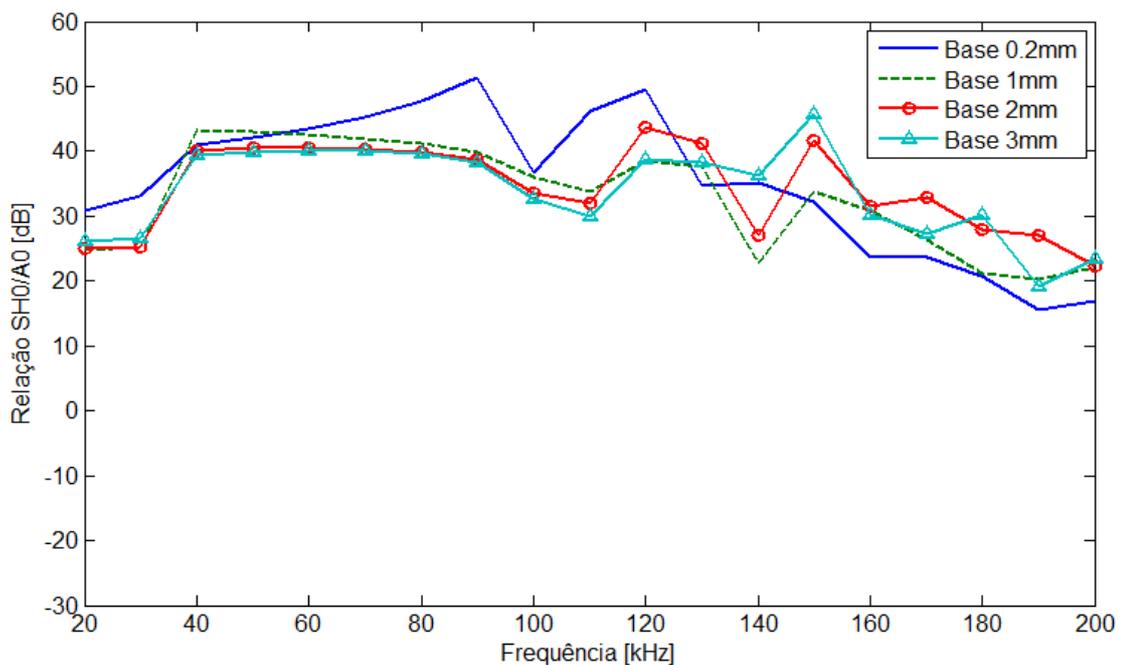
Figura 41 – Relação SH₀/A₀ para cerâmica piezoelétrica de 3mm

Figura 42 – Relação SH_0/A_0 para cerâmica piezoelétrica de 13mm

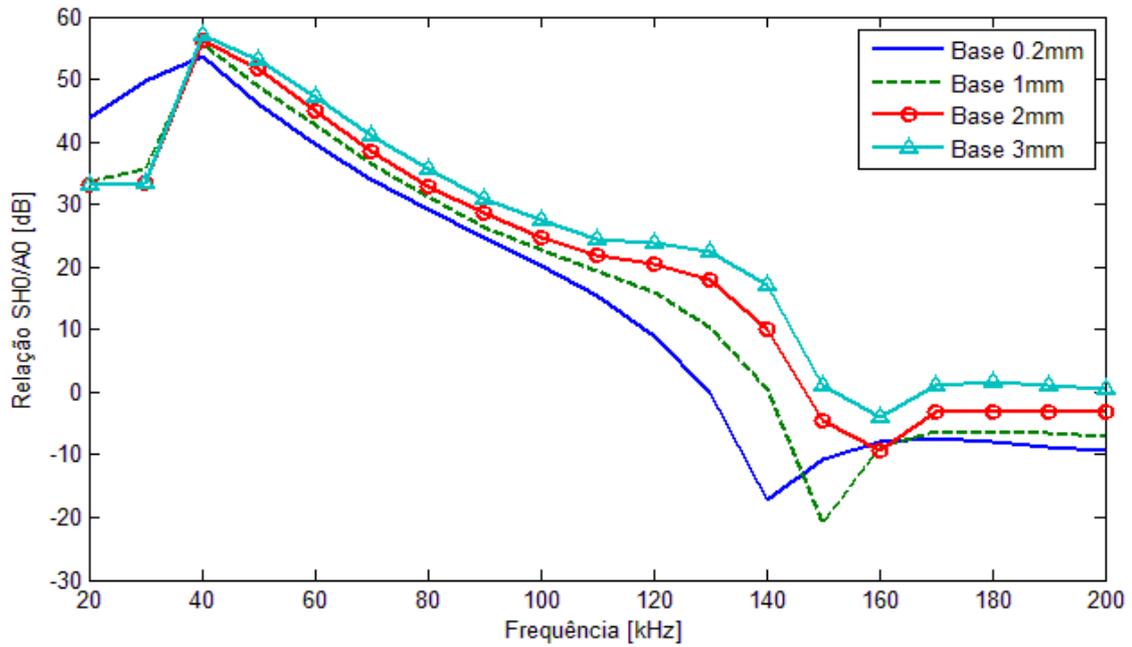
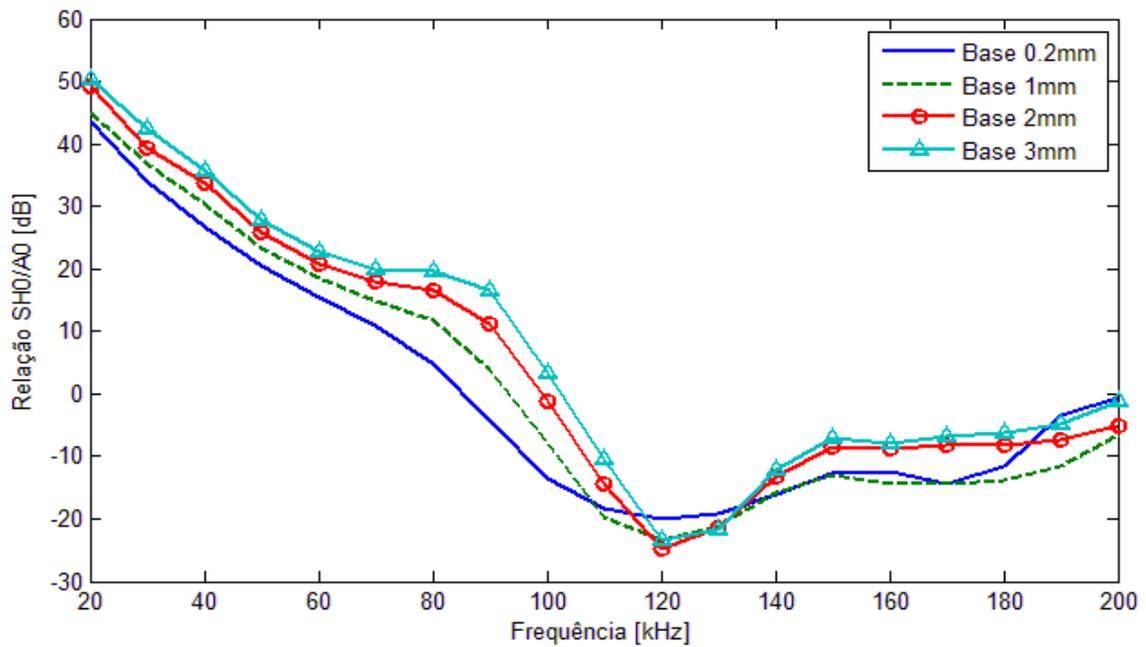


Figura 43 – Relação SH_0/A_0 para cerâmica piezoelétrica de 23mm



Na relação SH_0/A_0 para a cerâmica de 3mm nota-se que todos os valores apresentados são positivos, mostrando que o modo SH_0 foi predominante em relação ao modo A_0 em toda a

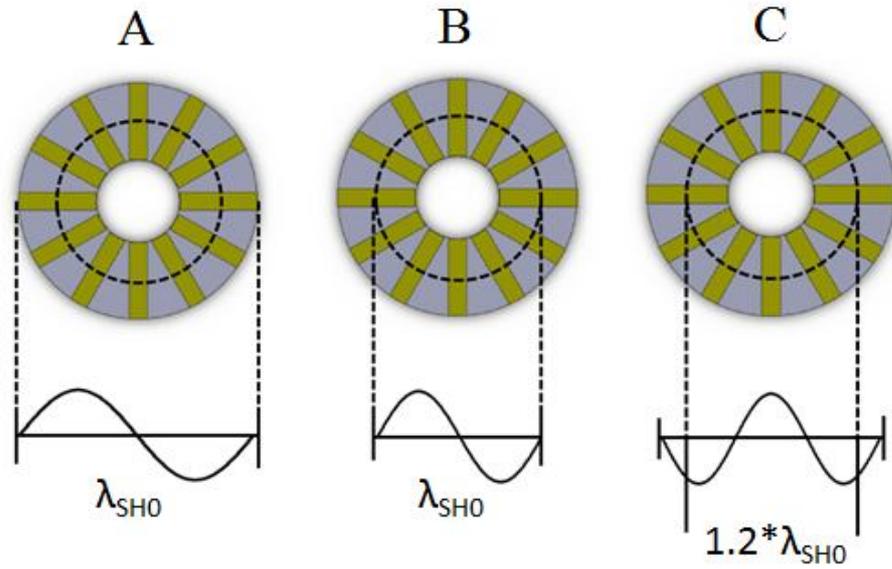
faixa de frequências analisada. Esta característica pode estar relacionada com fato da amplitude do modo A_0 apresentar valores muito baixos nesta configuração, os quais passaram a apresentar um pequeno crescimento a partir de 160kHz. De um modo geral, menores espessuras apresentaram uma relação SH_0/A_0 maior abaixo de 120kHz, acima desta frequência os resultados não apresentaram uma tendência definida.

Nas cerâmicas de 13mm é apresentada uma relação acima de 50dB para 40kHz, sendo que até 120kHz esta relação se mantém acima de 20dB. Já no caso de 23mm, essa relação só se mantém acima de 20dB para frequências abaixo de 60kHz. Considerando a faixa de frequências com predominância do modo SH_0 , em ambos os casos a relação é melhor quanto mais espessa for a base metálica, com exceção para a cerâmica de 13mm nas frequências de 20 e 30kHz. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato do modo A_0 ser mais atenuado quanto maior for a espessura da base metálica. Essa atenuação ocorre devido aos movimentos fora do plano encontrarem uma maior rigidez dada a maior espessura da peça metálica.

Nota-se também que com as cerâmicas maiores a relação SH_0/A_0 começa a diminuir em frequências mais baixas, isso ocorre devido ao maior crescimento do modo A_0 em menores frequências para as cerâmicas maiores. O fato da presença do modo A_0 ser maior com cerâmicas mais compridas passa novamente pela maneira de como é gerado este movimento: com cerâmicas maiores são deixados maiores espaços entre os elementos piezoelétricos ao se aproximar do raio externo do transdutor, de forma que o movimento entre as cerâmicas gerado fora do plano se torna menos atenuado por um elemento piezoelétrico sucessivo. Esta característica prejudica a utilização de cerâmicas mais compridas em maiores frequências. Porém, para operar em frequências mais baixas, as cerâmicas maiores apresentam uma maior relação SH_0/A_0 .

Para relacionar as amplitudes da resposta em frequência com as dimensões físicas dos transdutores simulados, pode-se considerar a resposta em função da relação D_N/λ , onde D_N é o diâmetro utilizado na normalização para três diferentes casos e λ o comprimento de onda do modo SH_0 para cada frequência analisada. Foram consideradas três situações distintas, na situação A é considerado o diâmetro externo do transdutor, na situação B é considerado o diâmetro médio do transdutor (sendo este a média entre o diâmetro interno e externo do transdutor para cada diferente comprimento de cerâmica) e na situação C foi considerado novamente o diâmetro médio e o comprimento de onda foi multiplicado por um fator de 1,2. As situações em que as relações apresentadas se igualam a 1 são ilustradas pela Figura 44.

Figura 44 – Situações A, B e C quando a relação D_N/λ se iguala a 1



Nas Figuras 45, 46 e 47 pode-se ver o comportamento da amplitude do modo SH_0 em função da relação D_N/λ nas situações A, B e C para as três diferentes dimensões do transdutor.

Figura 45 – Modo SH_0 em função das relações de D_N/λ para cerâmica de 3mm

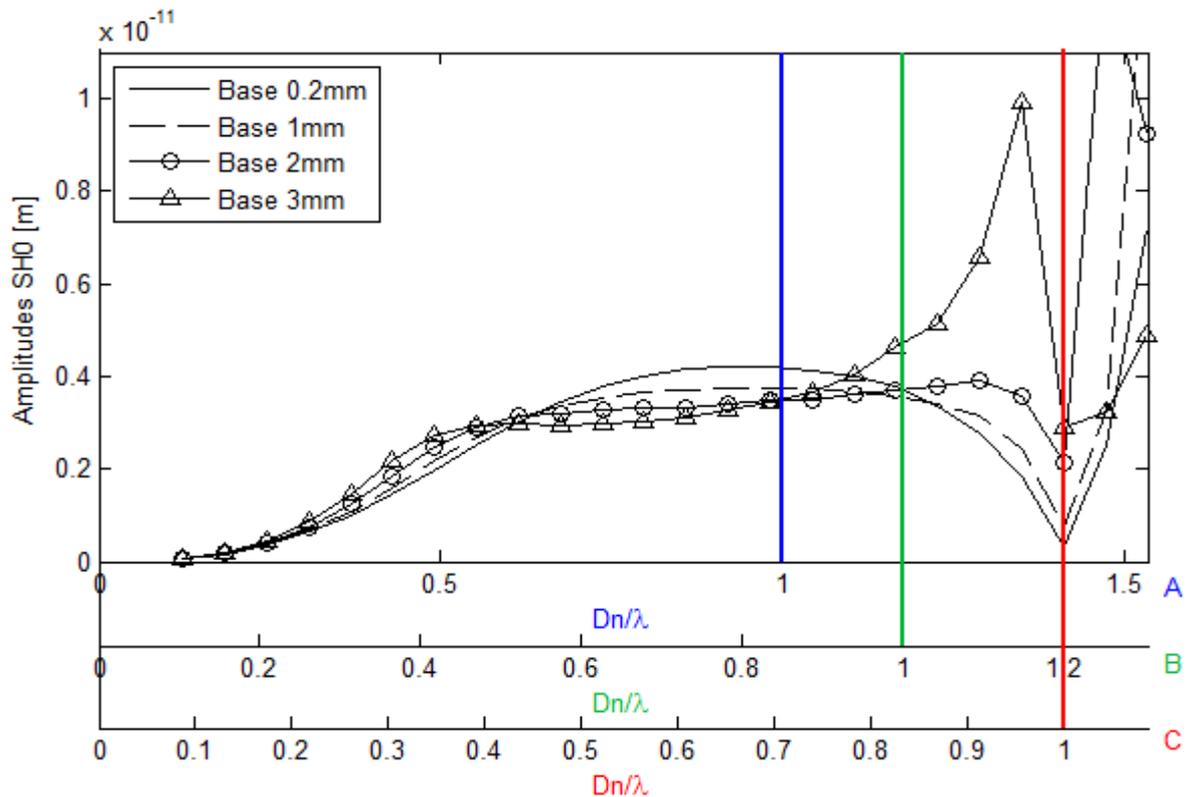


Figura 46 – Modo SH_0 em função das relações de D_N/λ para cerâmica de 13mm

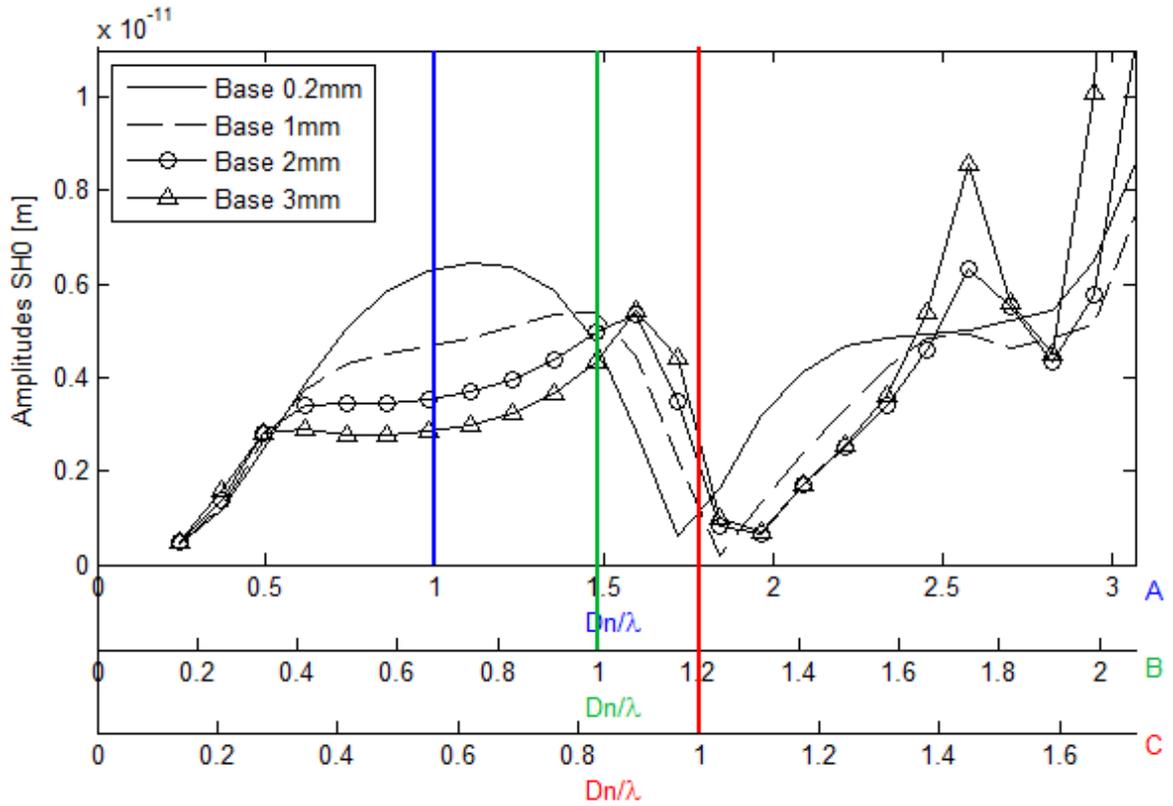
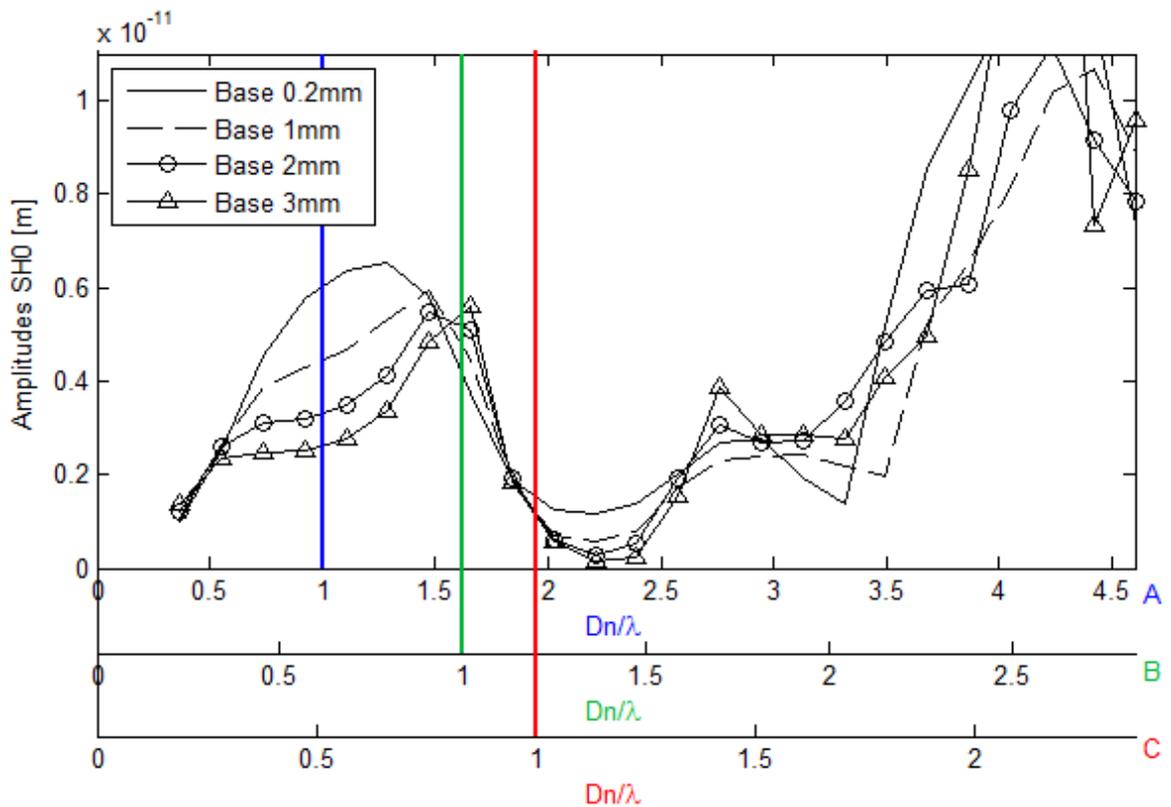


Figura 47 – Modo SH_0 em função das relações de D_N/λ para cerâmica de 23mm



Percebe-se que o comportamento do transdutor se modifica de acordo com o crescimento da espessura da base. Com uma base de 0.2mm, o modo SH_0 emitido apresenta um pico de valor máximo centralizado entre o início da faixa de frequências analisadas e o primeiro pico de valor mínimo observado. Com o aumento da espessura da base metálica, este valor máximo é deslocado para uma faixa de frequências maiores, mais próximas do valor mínimo, e é formada uma região que se aproxima de um patamar antes deste valor máximo. Para todas as dimensões simuladas, percebe-se que este comportamento se manteve, apresentando pequenas variações com a mudança de dimensão.

Para a situação A, onde foi traçado o eixo da relação D_N/λ considerado o diâmetro total do transdutor, pode-se notar que os valores da relação iguais a 1 se encontram próximos ao máximo de amplitude presentes quando a base possui 0.2mm de espessura. Na situação B, onde foi considerado o diâmetro médio, a relação vale 1 para valores próximos ao máximo deslocado com o crescimento da base metálica. Esta variação no comportamento do transdutor sugere uma mudança na primeira ressonância radial presente no transdutor em função do crescimento da base metálica. Para o modelo com cerâmicas de 3mm a relação igual a 1 não coincide perfeitamente com os máximos deslocados com o aumento da base, indicando que podem ocorrer variações no comportamento proposto em função da mudança do comprimento da cerâmica. Entretanto, a relação utilizada ainda apresenta uma boa indicação da faixa de frequências onde o transdutor irá apresentar máxima resposta.

Os valores mínimos de amplitude do modo SH_0 presentes nas simulações ocorreram sempre após o valor máximo. Inicialmente foi estimado que o mínimo do modo SH_0 se daria na frequência cujo comprimento de onda multiplicado por 1,5 correspondesse ao diâmetro do transdutor, pois teoricamente nesta frequência a onda gerada deveria interagir destrutivamente consigo mesma ao ser gerada pelo transdutor. A partir dos resultados obtidos, nota-se que este mínimo ocorre para os três diferentes transdutores quando o comprimento de onda do modo SH_0 multiplicado por 1,2 corresponde ao diâmetro médio do transdutor, fenômeno representado pela normalização utilizada na situação C.

Para avaliar a qualidade da omnidirecionalidade do modo SH_0 gerado, foi considerada uma relação entre o valor máximo e o valor médio do modo SH_0 ao longo dos ângulos adquiridos. Quanto mais próxima de 1 for esta relação, mais uniforme é a distribuição do modo, quanto mais se afastar de 1, maior é a distorção da distribuição angular. As Figuras 48, 49 e 50 mostram a distribuição desta relação ao longo da faixa de frequências analisada, considerando transdutores com cerâmicas de 3, 13 e 23mm. Nestas figuras é indicado como

exemplo o formato da distribuição de SH_0 nas frequências de 30, 50 e 190kHz, considerando um transdutor com base de 1mm (indicado pela linha verde).

Figura 48 – Relação de distorção do modo SH_0 utilizando cerâmica piezoelétrica de 3mm

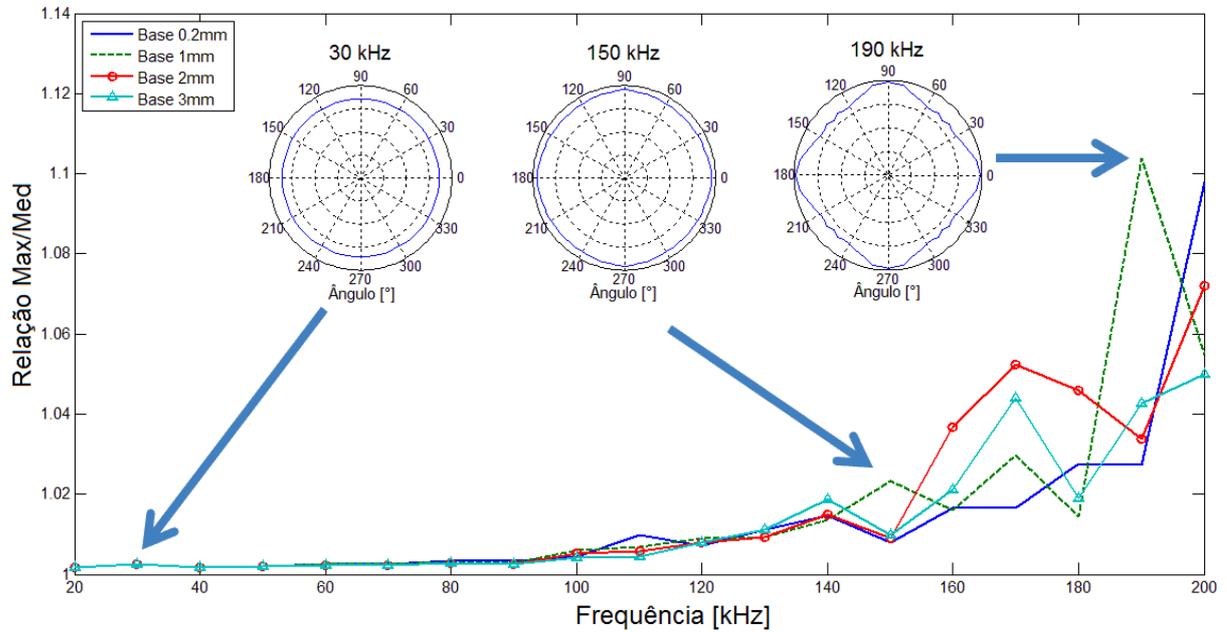


Figura 49 – Relação de distorção do modo SH_0 utilizando cerâmica piezoelétrica de 13mm

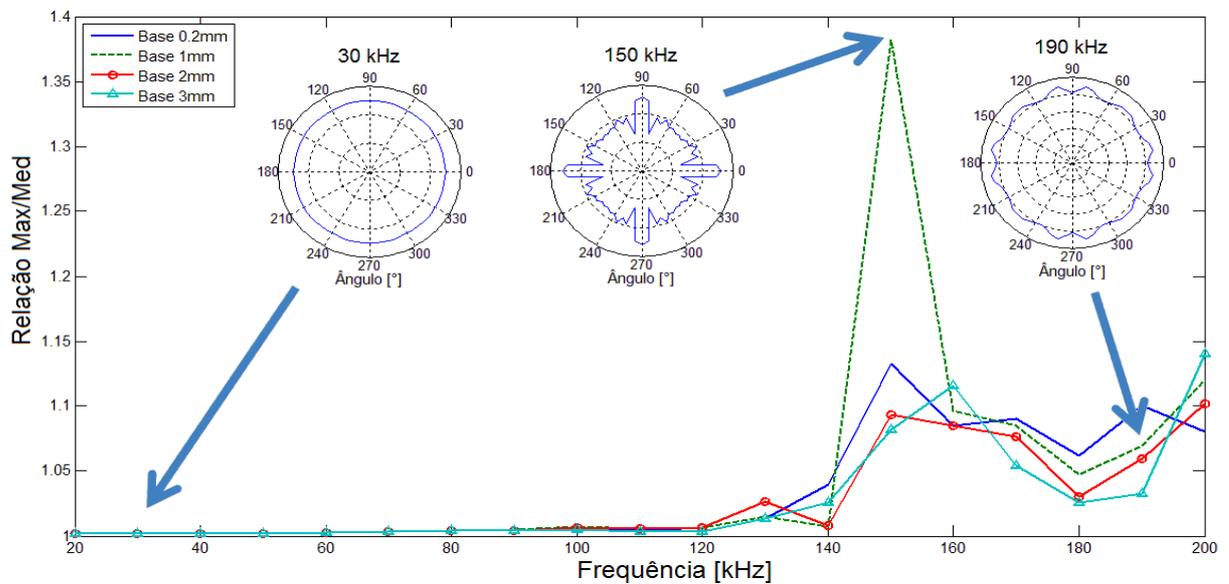
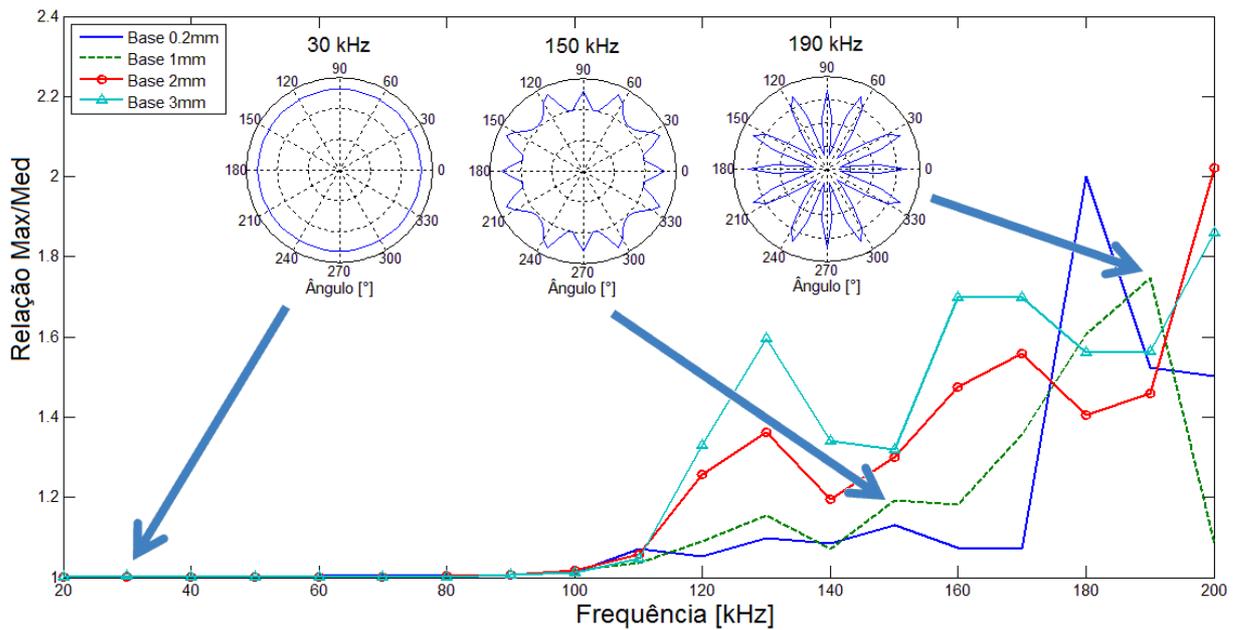


Figura 50 – Relação de distorção do modo SH₀ utilizando cerâmica piezoelétrica de 23mm



Na avaliação de cerâmicas com 3mm, a distorção da omnidirecionalidade ficou abaixo de 3% para todos os casos em frequências abaixo de 150kHz. Nos resultados referentes à 13mm, abaixo de 130kHz não é ultrapassado o limite de 3% de distorção. Nesta simulação também ocorreu uma distorção acima da média para 150kHz e base de 1mm, possivelmente devido ao mínimo de amplitude de SH₀ registrado após a ressonância radial presente no transdutor nesta configuração, que gerou um padrão de movimento muito diferente do esperado para gerar este modo de forma omnidirecional. Para a cerâmica de 23mm a distorção do modo SH₀ começou a aumentar em frequências mais baixas do que para as outras dimensões. Neste caso distorções abaixo de 3% só foram possíveis abaixo de 100kHz, frequências mais altas resultaram em distorções maiores.

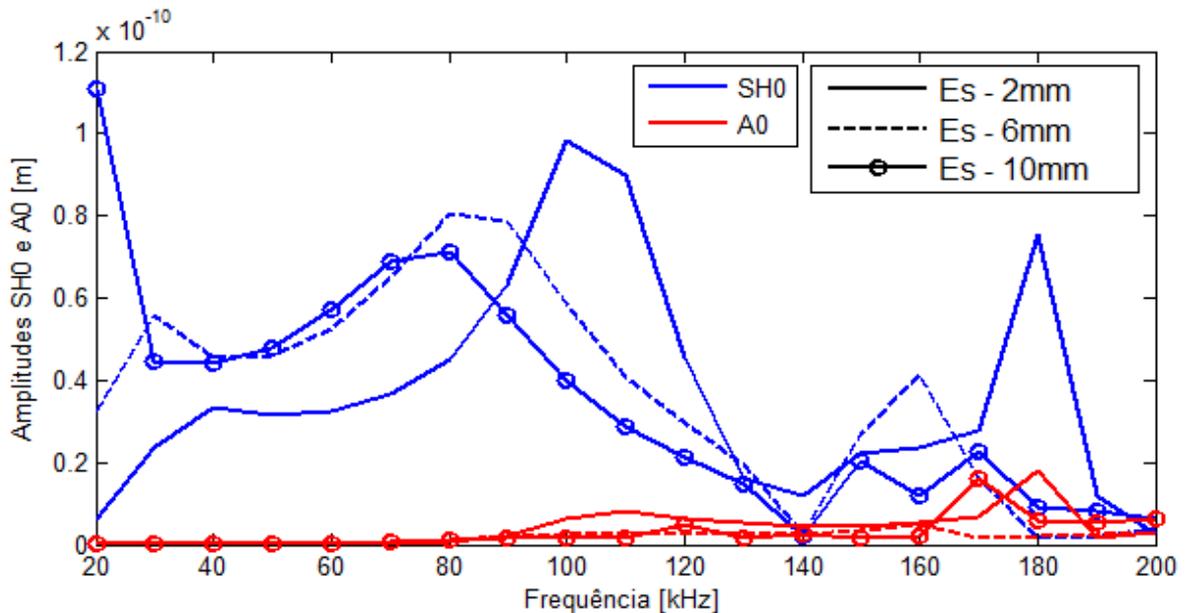
Considerando os valores de frequência que apresentam uma boa relação em dB entre os modos SH₀ e A₀ (valores abaixo de 100kHz), o modo SH₀ apresenta uma distribuição angular muito pouco distorcida.

4.1.3 Efeito da adição de uma massa metálica na parte superior do transdutor

Para a avaliação da influência de uma massa metálica fixada juntamente à face superior das cerâmicas piezoelétricas foi utilizada a dimensão de 13mm para o comprimento das cerâmicas e de 2mm para a espessura da base metálica. Ao se analisar a resposta obtida até uma faixa de frequências de 200kHz, pode-se notar um expressivo aumento de amplitude

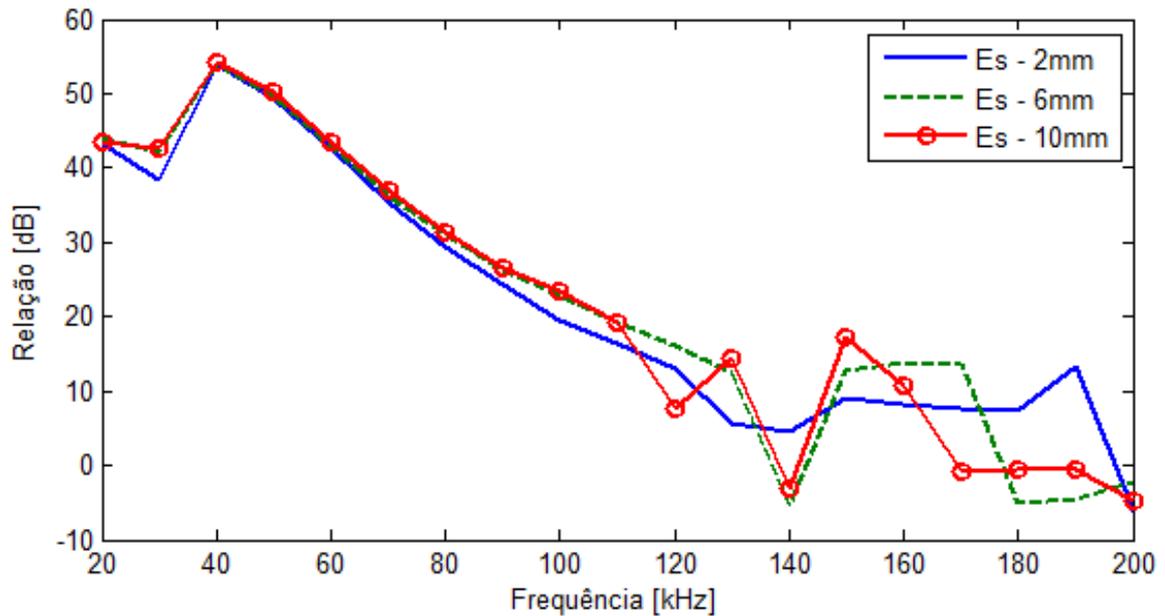
devido à adição da massa em relação às análises anteriores, sem a massa metálica. Em uma frequência de 100kHz, a amplitude obtida com a adição de uma massa de 2mm foi cerca de 25 vezes a amplitude obtida sem a presença da massa. Na Figura 51 pode-se observar as amplitudes obtidas para três espessuras diferentes da peça metálica adicionada.

Figura 51 – Amplitudes com a adição de massa metálica



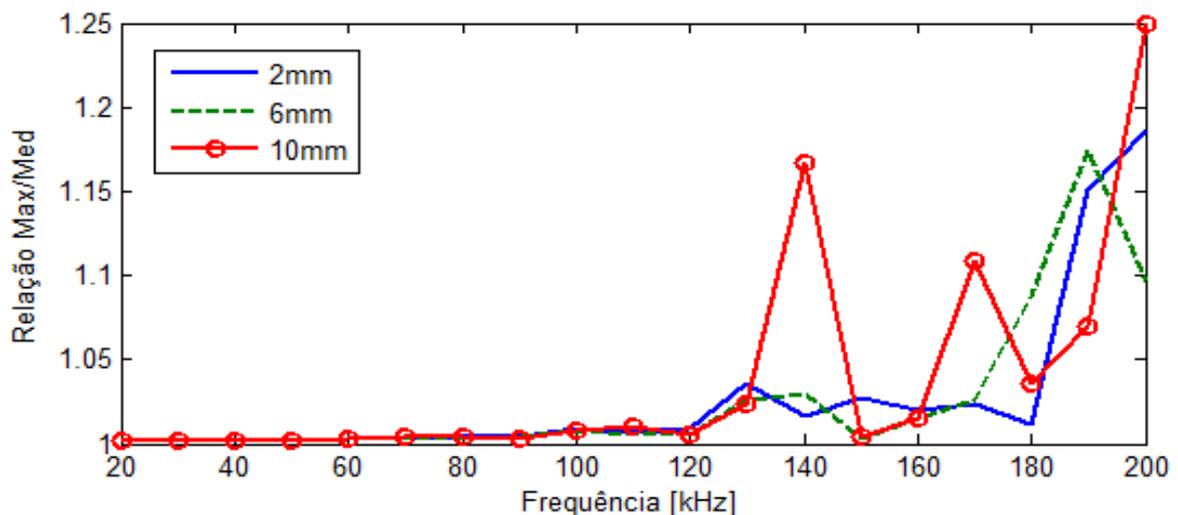
Percebe-se que com o aumento da espessura da peça ocorre uma diminuição da faixa de frequências em que ocorre o pico de amplitude do modo SH₀, esta característica levou a um aumento da amplitude da resposta em frequências menores. Nota-se ainda que com o crescimento da espessura da massa acoplada as amplitudes máximas do pico de ressonância apresentam uma diminuição de amplitude, assim como um aumento de amplitude da resposta em frequências próximas de 20kHz, possivelmente resultado de uma nova ressonância no sistema que surge com o aumento da massa metálica acoplada em valores próximos a 10mm. Em todas as espessuras analisadas ocorre um mínimo de amplitude do modo SH₀ em 140kHz, valor de frequência que corresponde à um valor muito próximo de 1 para a relação D_N/λ utilizada na situação C mostrada anteriormente.

Embora haja um aumento na amplitude do modo SH₀, também ocorre aumento do modo A₀ para as espessuras de massa analisadas. A relação das amplitudes SH₀/A₀ em decibéis pode ser vista na Figura 52.

Figura 52 – Relação SH_0/A_0 com a adição de massa metálica

Devido ao aumento de amplitude do modo A_0 , os resultados da relação SH_0/A_0 com a adição da massa metálica permaneceram muito próximos ao resultado obtido sem a presença da massa, mostrados na Figura 42. A maior diferença pode ser notada para 20 e 30 kHz, onde houve um ganho de aproximadamente 10dB com a presença da massa.

A qualidade da omnidirecionalidade do modo SH_0 também foi semelhante à obtida sem a massa metálica, apresentando um desvio menor de 2% da relação entre Max/Med em frequências abaixo de 120 kHz, conforme pode ser visto na Figura 53.

Figura 53 - Relação de distorção do modo SH_0 com a adição de massa metálica

4.2 Resultados Experimentais

Os resultados obtidos através dos ensaios experimentais são apresentados nesta seção para os dois diferentes modelos construídos. Inicialmente são avaliados os modos de propagação emitidos através da dupla transformada de Fourier. Em seguida são apresentados os resultados das amplitudes dos modos gerados pelos transdutores e a relação entre eles. Posteriormente é avaliada a amplitude da recepção do modo SH_0 pelos transdutores e por fim são apresentados os resultados relativos à qualidade da omnidirecionalidade apresentada tanto na emissão como na recepção das ondas.

4.2.1 Avaliação dos modos de propagação emitidos

Através da aquisição de um intervalo de pontos conforme descrito nos procedimentos do ensaio prático foi possível realizar a transformada de Fourier em duas dimensões, obtendo-se assim uma relação entre número de onda e frequência angular. Para representar os modos fundamentais, foi realizada a dupla transformada de Fourier considerando os deslocamentos tangenciais na superfície da chapa correspondendo ao modo SH_0 , os deslocamentos radiais correspondendo ao modo S_0 e os deslocamentos fora do plano da superfície correspondendo ao modo A_0 . Ao se realizar a soma dos resultados obtidos com a dupla transformada de Fourier pode-se plotar uma imagem contendo informações a respeito dos três modos fundamentais. Plotando no mesmo eixo de coordenadas as curvas de dispersão retiradas do software Disperse referentes aos modos analisados, pode-se identificar os modos presentes na emissão. Este procedimento foi realizado para o Modelo 1 de transdutor.

Na Figura 54 é apresentado o resultado obtido para o Modelo 1, com as curvas de dispersão representadas pela linha pontilhada. Os resultados em escala de cores representam os deslocamentos referentes a cada um dos modos, normalizados pelo maior valor obtido referente ao modo SH_0 . Percebe-se claramente que o modo SH_0 foi emitido, apresentando maiores amplitudes em frequências entre 30 e 120kHz. Nota-se que o modo A_0 também foi emitido com menores intensidades nesta faixa de frequências. A Figura 55 apresenta os mesmos resultados sem a presença do modo SH_0 , desta forma pode-se visualizar mais claramente os outros modos. Percebe-se agora que o modo A_0 está presente para praticamente toda a faixa de frequências analisadas, bem como o modo S_0 , modos que apresentaram suas maiores amplitudes entre 90 e 130kHz. Estes modos apresentaram menores amplitudes entre 30 e 70kHz.

Figura 54 – Relação $f \times k$ transdutor Modelo 1 – Modos SH_0 , S_0 e A_0

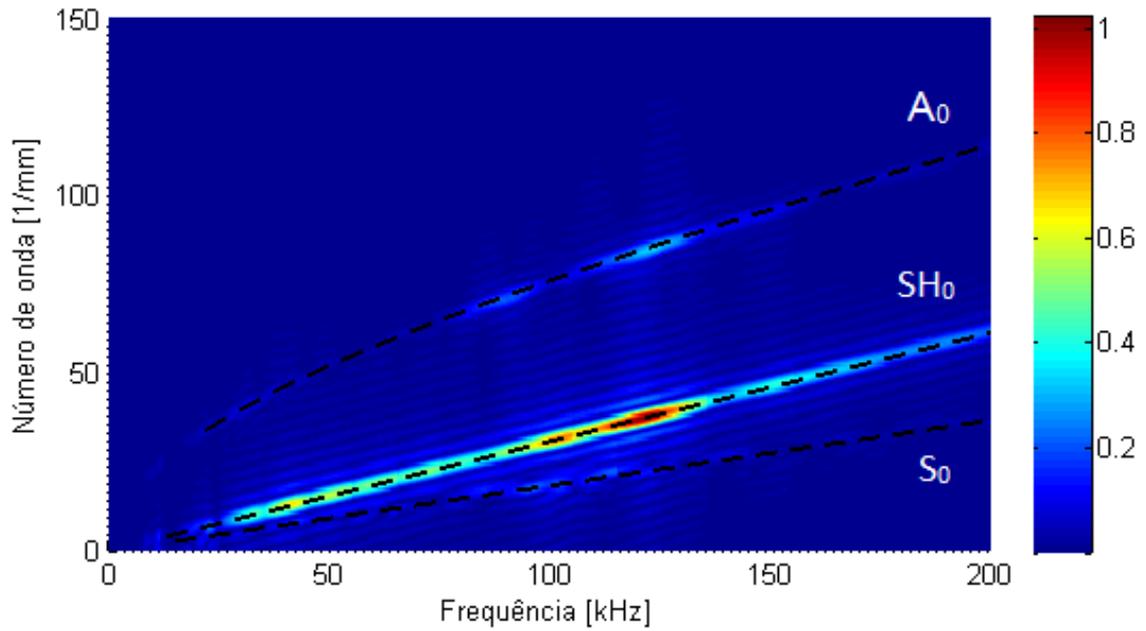
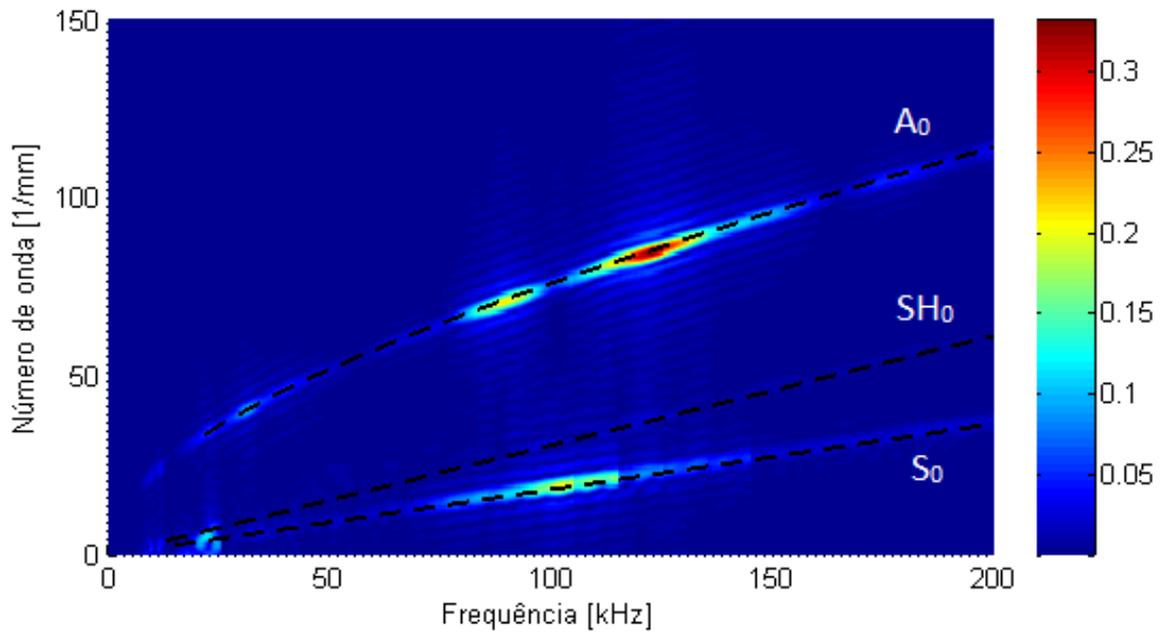


Figura 55 – Relação $f \times k$ transdutor Modelo 1 – Modos S_0 e A_0



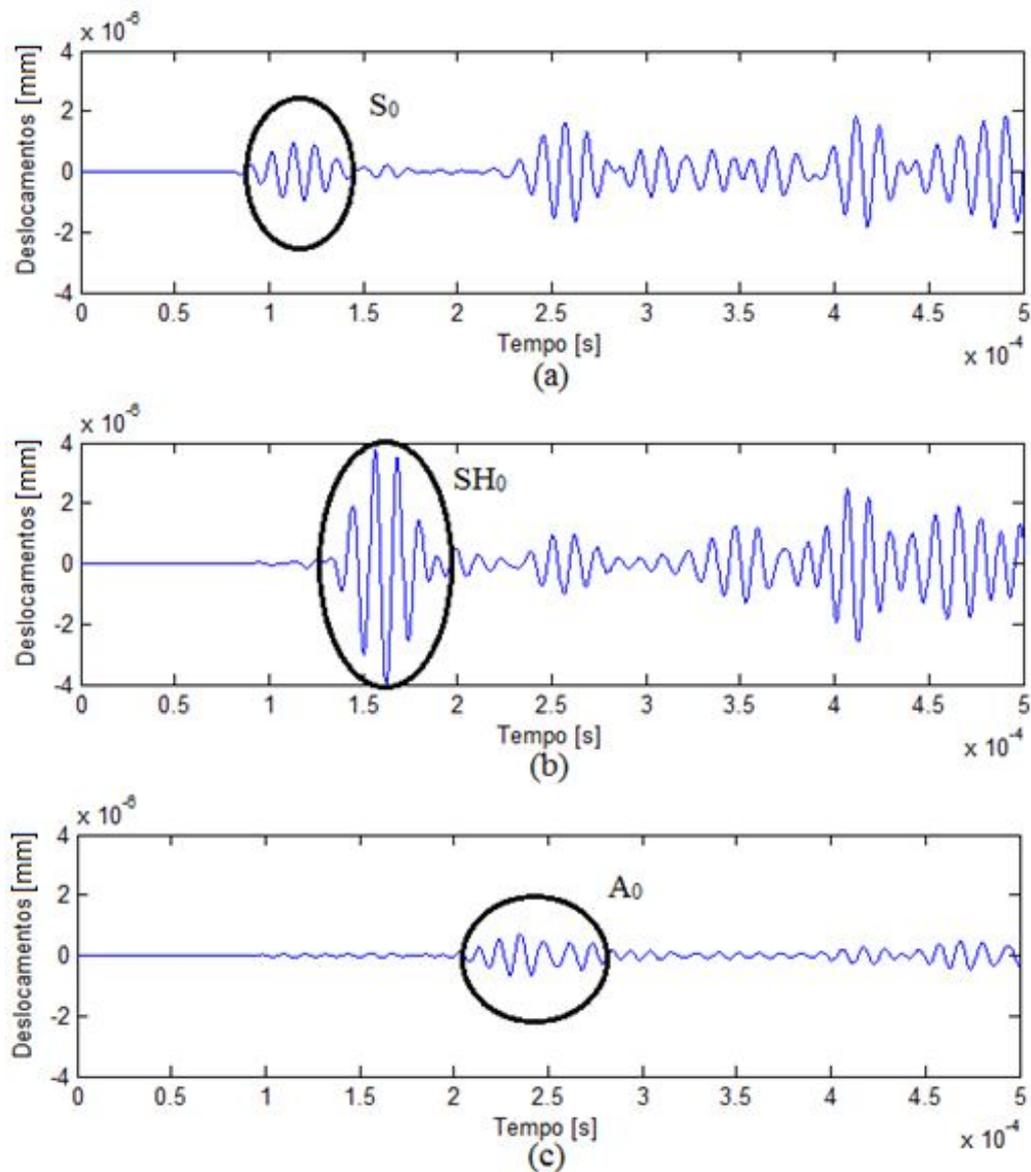
Conforme foi previsto através das análises por elementos finitos os modos SH_0 e A_0 foram propagados na chapa, no entanto o modo S_0 também foi emitido com baixa intensidade, o que não havia sido detectado pela simulação numérica.

4.2.2 Avaliação da intensidade de emissão

Para a avaliação da intensidade de emissão para cada modo foram adquiridos os deslocamentos em função do tempo para 10 pontos espaçados por 10° ao longo de 90° , conforme descrito na seção 3.3.4. Na Figura 56 (a), (b) e (c) pode-se visualizar, respectivamente, o sinal obtido em função do tempo para deslocamentos no sentido radial, tangencial e fora do plano da chapa, considerando o ponto referente a 45° do transdutor Modelo 1 e utilizando uma frequência central do sinal de excitação de 80kHz.

Figura 56 – Sinais obtidos para caracterização dos modos de propagação a 80kHz

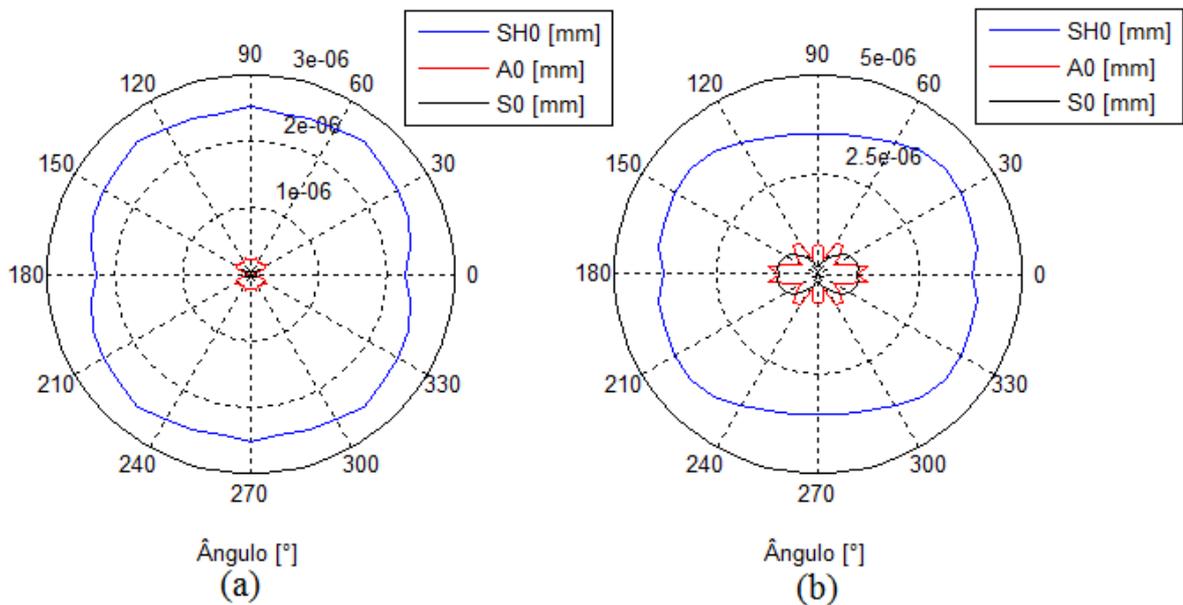
(a) Modo S_0 (b) Modo SH_0 (c) Modo A_0



As marcações indicam o sinal no tempo de chegada correspondente aos modos fundamentais de acordo com a velocidade de grupo para 80kHz retirada do software Disperse. Os modos de propagação foram separados avaliando o tempo de chegada de cada sinal, os movimentos tangenciais sendo relacionados com o modo SH_0 , os movimento radiais com o modo S_0 e os movimentos fora do plano com o modo A_0 . Para identificar os sinais relativos aos modos corretos, foi avaliado o tempo de chegada de cada um dos modos de acordo com a velocidade de grupo apresentada pelo software Disperse para cada frequência analisada.

A partir da confirmação dos modos representados por cada sinal, foi tomado como referência de amplitude para cada modo o valor máximo obtido pelo envelope do sinal no tempo indicado. Desta forma foi possível gerar gráficos de direcionalidade dos três modos fundamentais a partir da aquisição ao longo de 90° . A Figura 57 (a) e (b) ilustra a distribuição dos modos obtida para excitação com frequência central de 40kHz e de 80kHz referentes ao transdutor Modelo 1.

Figura 57 – Modelo 1: Direcionalidade dos modos SH_0 , A_0 e S_0 (a) 40kHz (b) 80 kHz

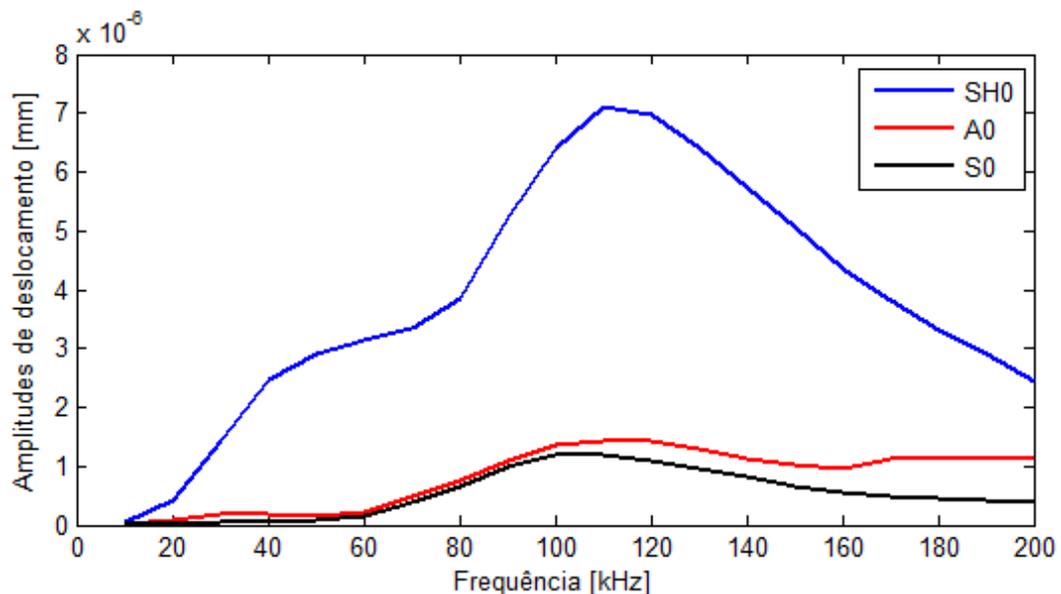


Os gráficos de distribuição angular referentes aos modelos 1 e 2 de transdutor para todas as faixas de frequências analisadas podem ser visualizados nos APÊNDICES A e B, respectivamente. Embora as medições tenham sido realizadas em um intervalo de 90° , os gráficos foram gerados considerando um intervalo de 0 à 360° para melhor visualização, considerando que a emissão dos modos possua a mesma distribuição nos demais quadrantes.

Para estimar a amplitude de cada modo emitido em função da frequência, foi considerada a média dos valores ao longo do intervalo angular medido. A distribuição da amplitude dos modos fundamentais avaliados em uma faixa de frequências entre 10 e 200kHz para o Modelo 1 pode ser vista na Figura 58.

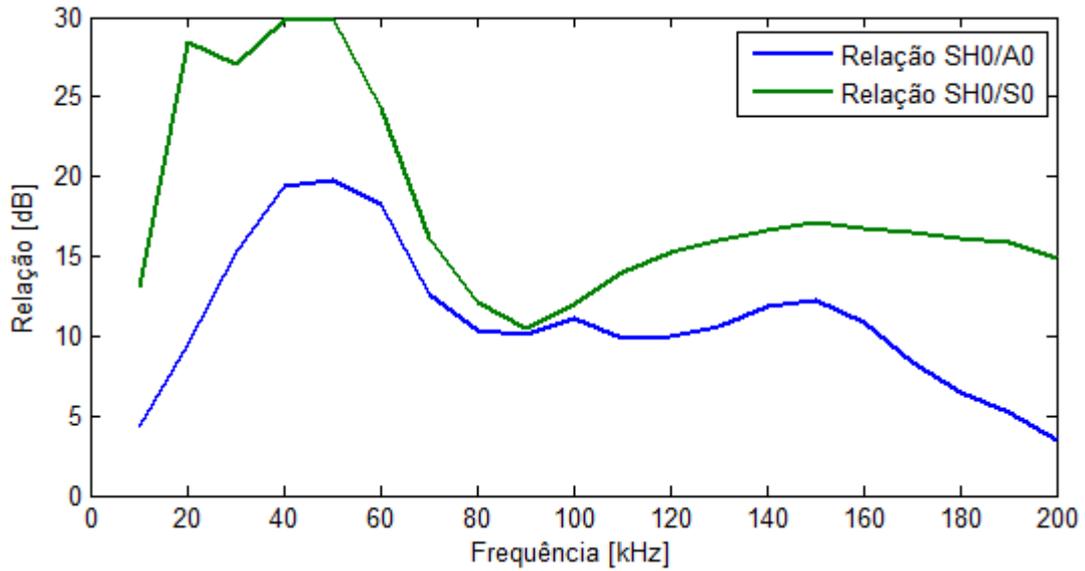
Conforme previsto pelas simulações numéricas, existe um crescimento do modo SH_0 com o aumento da frequência de excitação até cerca de 110kHz. Percebe-se que entre 40 e 80kHz existe um crescimento menos acentuado do modo SH_0 , comportamento semelhante ao obtido através das simulações numéricas para esta configuração de transdutor. Neste Modelo o mínimo de amplitude presente para o modo SH_0 não ficou tão evidente como nas simulações numéricas, o que pode ser resultado da natureza do ensaio experimental, onde é excitada uma banda de frequências através do sinal Toneburst, que resultou em um sinal onde este mínimo é suprimido pela resposta das frequências vizinhas. Ainda assim é possível identificar uma região onde ocorre uma queda da amplitude, após a presença de um pico positivo.

Figura 58 – Modelo 1: Amplitude dos modos SH_0 , A_0 e S_0 medidos



Os modos A_0 e S_0 apresentaram baixa amplitude de resposta até 60kHz, a partir desta frequência tiveram um crescimento mais acentuado. Esse aumento prejudicou a relação entre os modos, como pode ser visto na Figura 59, onde houve uma redução na relação SH_0/A_0 a partir de 70kHz.

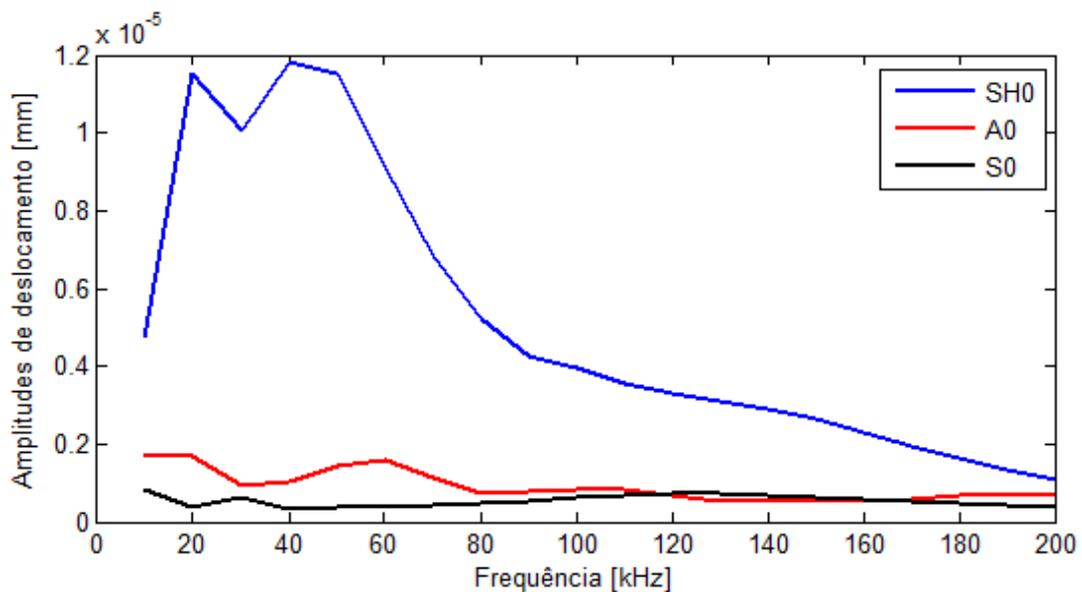
Figura 59 – Modelo 1: Relação entre os modos SH_0/A_0 e SH_0/S_0



A relação SH_0/S_0 apresentou um comportamento semelhante à relação SH_0/A_0 , porém com valores mais altos devido à menores amplitudes do modo S_0 . Esta relação se manteve acima de 25dB em praticamente toda a faixa de frequências entre 20 e 60kHz.

No transdutor Modelo 2, com o acoplamento da massa metálica na parte superior do arranjo de cerâmicas, a amplitude do modo SH_0 emitido foi cerca de 10 vezes mais alta em relação ao Modelo 1 em frequências entre 20 e 30kHz, como pode ser visto na Figura 60.

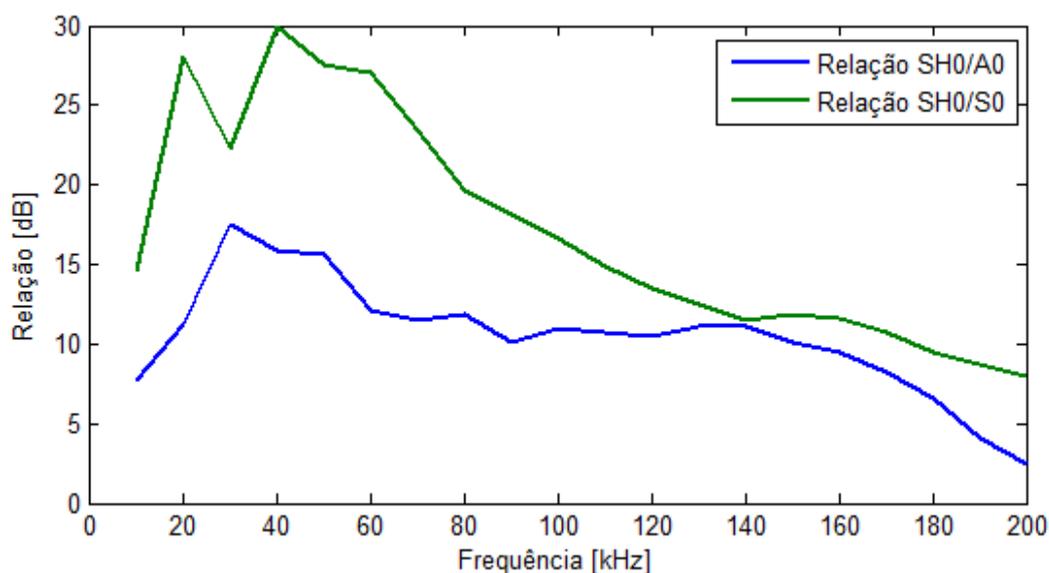
Figura 60 – Modelo 2: Amplitude dos modos SH_0 , A_0 e S_0 medidos



A resposta obtida com o Modelo 2 apresentou maiores amplitudes do modo SH_0 para frequências menores em relação aos modelos anteriores. Este crescimento da amplitude do modo SH_0 em baixas frequências não foi acompanhado pelo crescimento dos outros dois modos de propagação, permitindo assim a obtenção de uma boa relação SH_0/A_0 e SH_0/S_0 nesta faixa de operação, como mostra a Figura 61.

Em uma faixa de frequências entre 30 e 50kHz foi possível atingir uma relação SH_0/A_0 acima de 15dB. As maiores relações entre os modos SH_0/S_0 foram obtidas em uma faixa de frequências entre 20 e 70kHz, onde a relação entre os modos permaneceu acima de 22dB.

Figura 61 – Modelo 2: Relação entre os modos SH_0/A_0 e SH_0/S_0



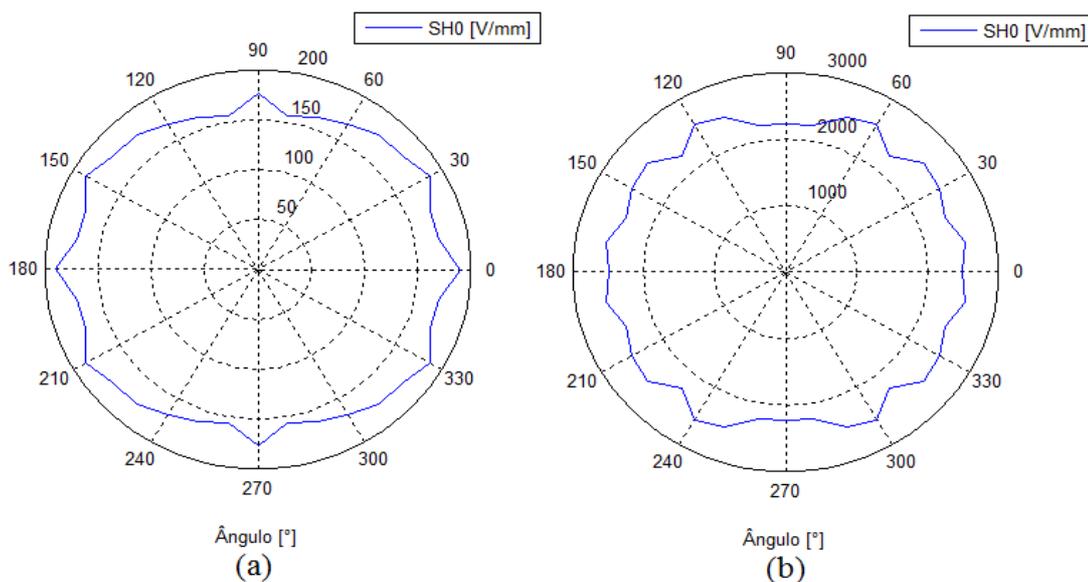
As diferenças no comportamento da resposta obtida entre as simulações e o ensaio prático podem ser resultado da construção dos modelos físicos, onde foi necessário adicionar componentes para facilitar o funcionamento do transdutor, como, por exemplo, o laminado flexível de poliamida utilizado para realizar os contatos da parte superior das cerâmicas.

4.2.3 Avaliação da intensidade da recepção

A avaliação da recepção do transdutor frente ao modo SH_0 foi feita através da aquisição de sinais de resposta do transdutor gerados por perturbações enviadas por um sistema piezoelétrico, conforme descrito na seção 3.3.4. Para gerar os gráficos de direcionalidade da recepção do modo SH_0 foi utilizado o valor máximo obtido pelo envelope

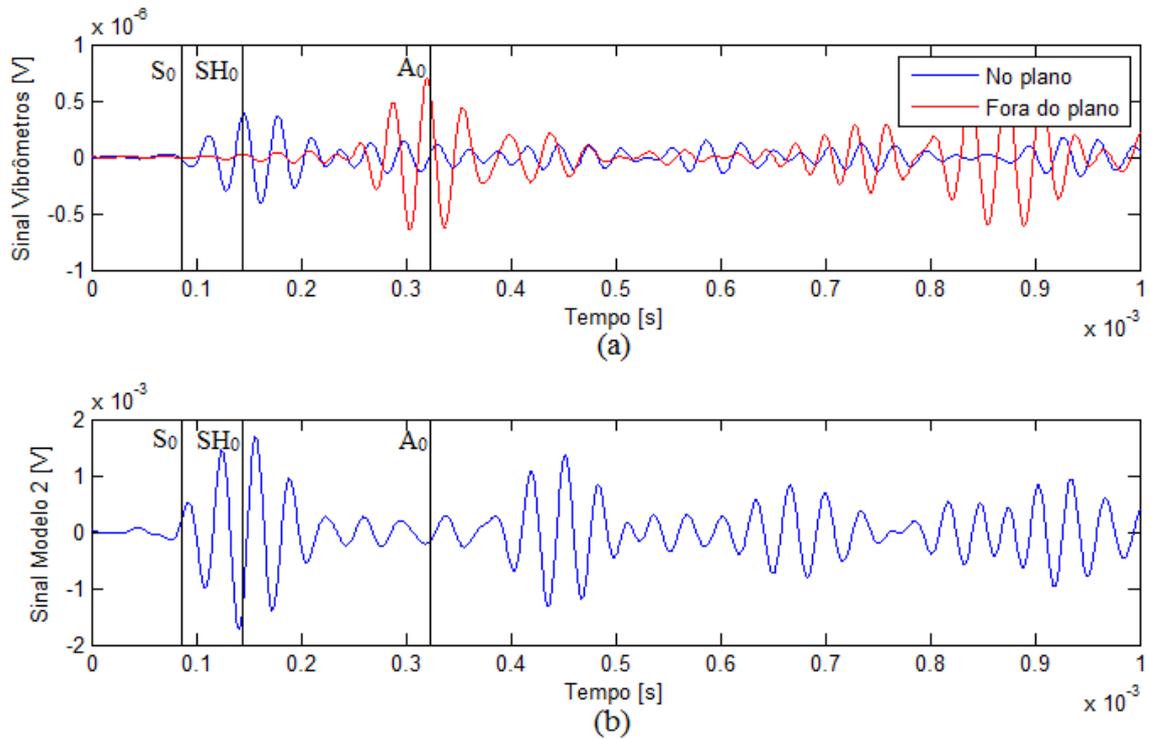
do sinal no tempo de chegada do modo SH_0 . Realizando este procedimento ao longo de 90° , foram obtidos os gráficos de direcionalidade para cada frequência analisada. As Figuras 62 (a) e (b) ilustram a distribuição da recepção obtida para excitação com frequência central de 20kHz e de 80kHz referentes ao transdutor Modelo 2.

Figura 62 – Modelo 2: Direcionalidade do Modo SH_0 na recepção (a) 20kHz (b)80kHz



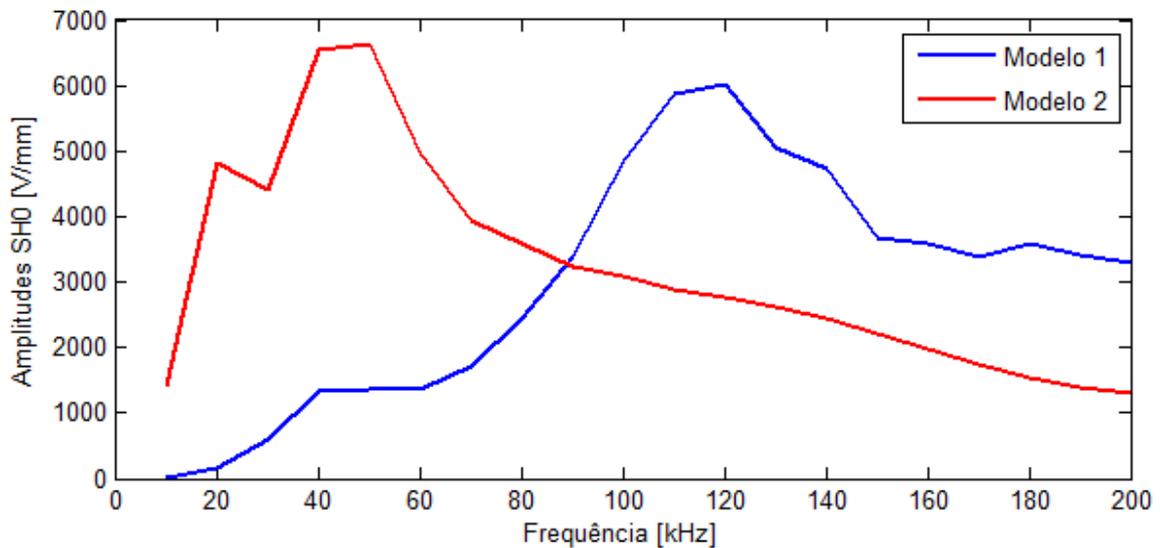
Os gráficos de distribuição angular da recepção referentes aos modelos 1 e 2 de transdutor para todas as faixas de frequências analisadas podem ser visualizados nos APÊNDICES C e D, respectivamente. Para estimar a amplitude do modo SH_0 recebido em função da frequência, foi considerada a média dos valores ao longo do intervalo angular medido. A amplitude da recepção dos modos S_0 e A_0 não foram mensuradas, o modo S_0 não foi detectado no sinal de aquisição (de acordo com seu respectivo tempo de chegada). Caso o modo A_0 tenha sido detectado pelos transdutores, não foi possível determinar sua amplitude, devido à diversas reflexões nas bordas da chapa causadas pelos outros modos emitidos. Estes modos refletidos com maiores velocidades acabaram sobrepondo o sinal no tempo de chegada previsto para o modo A_0 , impossibilitando a sua identificação, conforme pode ser visto no exemplo da Figura 63. Nota-se que o primeiro pico do sinal de deslocamento transversal medido no plano obtido pelo vibrômetro corresponde ao tempo de chegada do modo SH_0 (indicado pela linha vertical na Figura 63). Os picos de amplitude apresentados pelo Modelo 2 na recepção após 0.4ms são referentes à reflexões dos modos de propagação nas bordas da chapa utilizada, não sendo utilizados para obtenção dos resultados.

Figura 63 – Recepção do transdutor Modelo 2 orientado a 40° - 30kHz. (a) Sinal obtido com o conjunto de vibrômetros (b) Sinal adquirido pelo transdutor Modelo2



A distribuição da amplitude de recepção do modo SH_0 avaliado em uma faixa de frequências entre 10 e 200kHz para os dois modelos pode ser vista na Figura 64.

Figura 64 – Amplitudes do Modo SH_0 na recepção em função da frequência

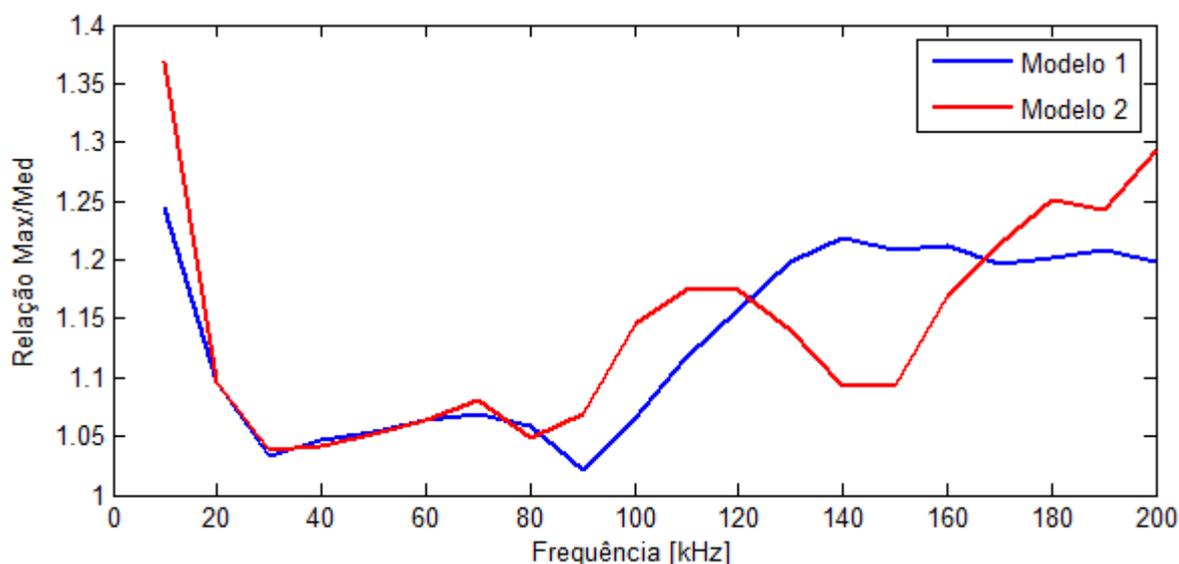


Percebe-se que a amplitude da resposta do modo SH_0 para os dois modelos construídos seguiu uma tendência semelhante à apresentada pelas suas respectivas emissões ao longo da faixa de frequências analisada. Um comportamento semelhante a este já era esperado, visto que comprimentos de onda próximos aos emitidos com maior intensidade pelos transdutores também gerariam um sinal elétrico maior ao interagir com o arranjo piezoelétrico. Para uma faixa de frequências entre 30 e 50kHz, a intensidade do sinal gerado pelo Modelo 2 com a massa metálica foi cerca de 5 vezes maior que o Modelo 1.

4.2.4 Avaliação da distorção na distribuição omnidirecional

A qualidade da distribuição omnidirecional do modo SH_0 pôde ser avaliada a partir da relação entre o valor máximo com o valor médio da amplitude deste modo ao longo dos ângulos medidos. A relação apresentada para a emissão do modo SH_0 em função da frequência para os três modelos de transdutores construídos pode ser visualizada na Figura 65.

Figura 65 – Relação de distorção do modo SH_0 obtido na emissão dos transdutores



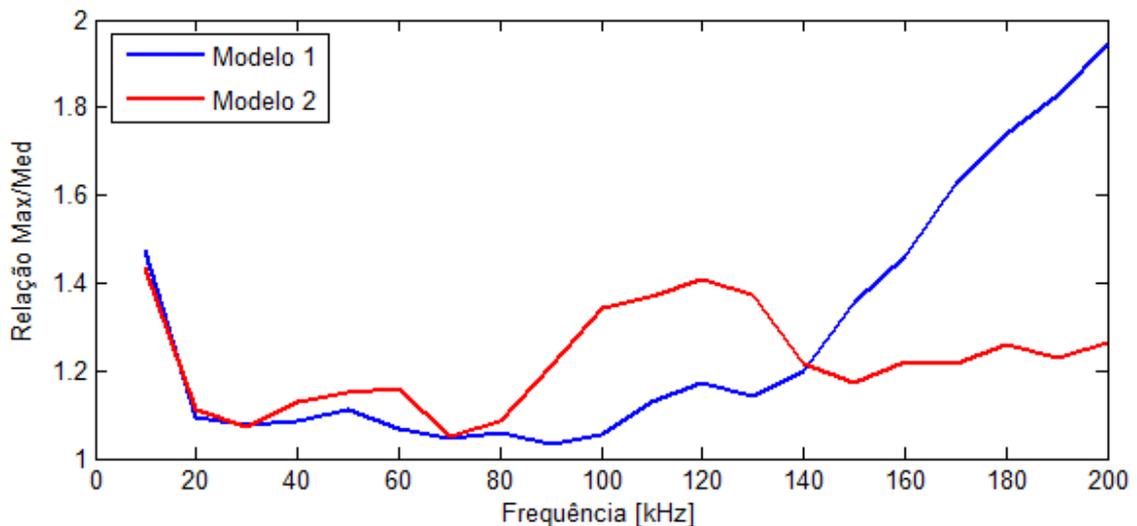
Os valores onde a distorção é menor de 10% se encontram dentro de uma faixa de frequências entre 20 e 90kHz para todos os transdutores construídos. Pode-se considerar que dentro desta faixa de frequências estes modelos teriam uma distorção aceitável da distribuição

do modo SH_0 . A partir de frequências maiores de 100kHz a distorção se torna muito alta, tornando inviável a utilização de transdutores como estes nestas faixas de frequência.

As menores qualidades da distribuição do modo SH_0 apresentadas nas análises experimentais podem ser resultantes de diferentes fatores, como erros no alinhamento das cerâmicas na construção do sensor, irregularidades geométricas na base metálica construída e instalação imperfeita do transdutor, onde o adesivo epóxi pode ter aderido de forma diferente ao longo da base.

A relação da distorção apresentada pelos dois modelos de transdutor para a recepção do modo SH_0 pode ser vista na Figura 66.

Figura 66 – Relação de distorção do modo SH_0 obtido na recepção dos transdutores



Assim como na emissão, o Modelo 1 apresentou uma distorção menor de 10% em uma faixa entre 20 e 100kHz. O Modelo 2 apresentou distorção menor do que 10% apenas para as frequências de 20, 30, 70 e 80kHz. Essa característica na recepção acabou restringindo a sua faixa de operação à frequências mais baixas, visto que a partir de 70kHz a amplitude de sua resposta já não é considerada suficientemente alta.

4 CONCLUSÕES

Um novo modelo de transdutor por ondas guiadas para gerar o modo SH_0 de forma omnidirecional a partir de um arranjo de cerâmicas piezoelétricas foi proposto. Através de simulações numéricas, foram avaliados parâmetros geométricos desta configuração de transdutor para determinar a influência de cada um deles em sua resposta, auxiliando na determinação da melhor configuração para a faixa de operação desejada.

Com os resultados obtidos pode-se verificar que um transdutor com 12 cerâmicas distribuídas radialmente apresentou melhor amplitude do modo SH_0 , assim como menor intensidade do modo A_0 , em relação às configurações com menor número de sensores. Percebe-se que com o aumento da espessura da base do transdutor é aumentada a relação SH_0/A_0 devido à atenuação do modo A_0 , com exceção ao transdutor com cerâmica de 3mm de comprimento, onde este fenômeno não foi observado. Nota-se também que com o aumento do comprimento do elemento piezoelétrico, menor é a faixa de operação devido ao aumento do modo A_0 em altas frequências. Além disso, a distorção do modo SH_0 também cresce com o aumento do comprimento da cerâmica.

Foram construídos dois diferentes modelos de transdutor a partir dos resultados obtidos com os estudos numéricos, em todos os casos a amplitude da resposta em frequência seguiu um comportamento esperado conforme as análises numéricas. No Modelo 1 a faixa de frequências com melhor resposta para operação foi entre 30 e 70kHz. No Modelo 2, devido à adição da massa metálica, a melhor faixa de operação apresentou resposta com maiores amplitudes em frequências mais baixas, em um intervalo entre 20 e 40kHz.

Pôde-se constatar que a metodologia de simulações numéricas utilizada para caracterizar a resposta do transdutor em função da frequência apresentou respostas condizentes com ensaios reais, tornando este procedimento uma valiosa ferramenta a ser utilizada no projeto de transdutores piezoelétricos de ondas guiadas.

5 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, novas configurações de transdutores piezoelétricos podem ser testadas utilizando a mesma metodologia de avaliação com simulações numéricas, verificando-se se a mesma se aplica em diferentes geometrias de transdutores.

Em relação ao modelo de transdutor proposto, pode-se avaliar a sua eficácia se instalado em estruturas mais espessas, verificando se os modos de propagação serão obtidos nas mesmas proporções.

Testes em escala real podem ser realizados utilizando arranjos do modelo proposto para detecção de defeitos, aplicando algoritmos de geração de imagem para indicação da localização e da perda de espessura de defeitos por corrosão.

REFERÊNCIAS

ABAQUS DOCUMENTATION. **Simulia Abaqus 6.14 Documentation**. Disponível em:

<<http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/index.html>>. Acesso em: 04 mai. 2016.

ALLEYNE, D., CAWLEY, P. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multicode signals. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 89, n. 3, p. 1159-1168, Mar. 1991.

ASM HANDBOOK COMMITTEE. **Metals Handbook Volume 17 - Nondestructive Evaluation and Quality Control**. 9th ed. ASM International, 1989.

AULD, B. A. **Acoustic Fields and Waves in Solids Volume II**. Stanford: John Wiley & Sons Inc., 1973.

BELANGER, P., BOIVIN, G. Development of a low frequency omnidirectional piezoelectric shear horizontal wave transducer. **Smart Materials and Structures**, v. 25, Abr. 2016.

CLARKE, T. **Guided Wave Health Monitoring of Complex Structures**. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Mechanical Engineering, Imperial College London. London, 2009.

DISPERSE. **Guided wave dispersion curve calculation**. Disponível em:

<<http://www.disperse.software>>. Acesso em: 11 Nov. 2016.

DUPONT. **Piralux® Copper Clad Laminates**. Disponível em:

<<http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electrical-materials/flexible-rigidflex-circuit-materials/brands/pyralux-flexible-circuit/sub-brands/pyralux-copper-clad-laminates.html>>. Acesso em: 14 ago. 2017.

FARRAR, C. R., WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of The Royal Society A**, v. 365, p. 303-315, Dez. 2006.

FERROPERM PIEZOCERAMICS. **High Quality Components and Materials for the Electronic Industry**. Disponível em: <<http://www.ferroperm-piezo.com/>>. Acesso em: 16 set. 2016.

FLORIDA CORROSION CONTROL. **Photo Gallery**. Disponível em: <<http://www.flcorrosioncontrol.com/photo-gallery/>>. Acesso em: 21 mar. 2017.

GALVAGNI, A. **Pipeline Health Monitoring**. Thesis (Doctor of Engineering) – Department of Mechanical Engineering, Imperial College London. London, 2013.

GRAFF, K. F. **Wave Motion in Elastic Solids**. New York: Dover Publications Inc., 1991.

GUIDED ULTRASONICS LTD. **GUL**. Disponível em: <<https://www.guided-ultrasonics.com/>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

GUIDEDWAVE. **Plates and Shells**. Disponível em: <<http://www.gwultrasonics.com/knowledge/plateshell/>>. Acesso em: 28 abr. 2017.

INTERPLAY. **Produtos**. Disponível em: <<http://www.interplay.com.br/produtos.html>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

JILES, D. C. Theory of the magnetomechanical effect. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 28, p. 1537-1546, Ago. 1995.

KINO, G. S. **Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing**. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1987.

MA, J., CAWLEY, P. Low-frequency pulse echo reflection of the fundamental shear horizontal mode from part-thickness elliptical defects in plates. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 127, n. 6, p. 3485-3493, Jun. 2010.

MATLAB DOCUMENTATION. **Matlab**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/>>. Acesso em: 22 mai. 2016.

MIAO, H. et al. A new omnidirectional shear horizontal wave transducer using face-shear (d_{24}) piezoelectric ring array. **Ultrasonics**, v. 74, p. 167-173, Fev. 2017.

MOORE, P. O., et al. **Nondestructive Testing Handbook Volume 6: Acoustic Emission Testing**. Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 2005.

MORGAN TECHNICAL CERAMICS. **Physical Basis**. Disponível em:

<<http://www.morgantechnicalceramics.com/media/4126/chapter2.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2016.

RAJAGOPAL, P. et al. On the use of absorbing layers to simulate the propagation of elastic waves in unbounded isotropic media using commercially available Finite Element packages. **NDT&E International**, v. 51, p. 30-40, Out. 2012.

ROSE, J. L. Dispersion Curves in Guided Wave Testing. **ASNT Materials Evaluation**, v.61, p.20-22, Jan. 2003.

ROSE, J. L. **Ultrasonic Guided Waves in Solid Media**. New York: Cambridge University Press, 2014.

SEUNG, H. M., KIM, H. W., KIM, Y. Y. Development of an omni-directional shear-horizontal wave magnetostrictive patch transducer for plates. **Ultrasonics**, v. 53, p. 1304-1308, Set. 2013.

SEUNG, H. M., PARK, I., KIM, Y. Y. An omnidirectional shear-horizontal guided wave EMAT for a metallic plate. **Ultrasonics**, v. 69, p. 58-66, Jul. 2016.

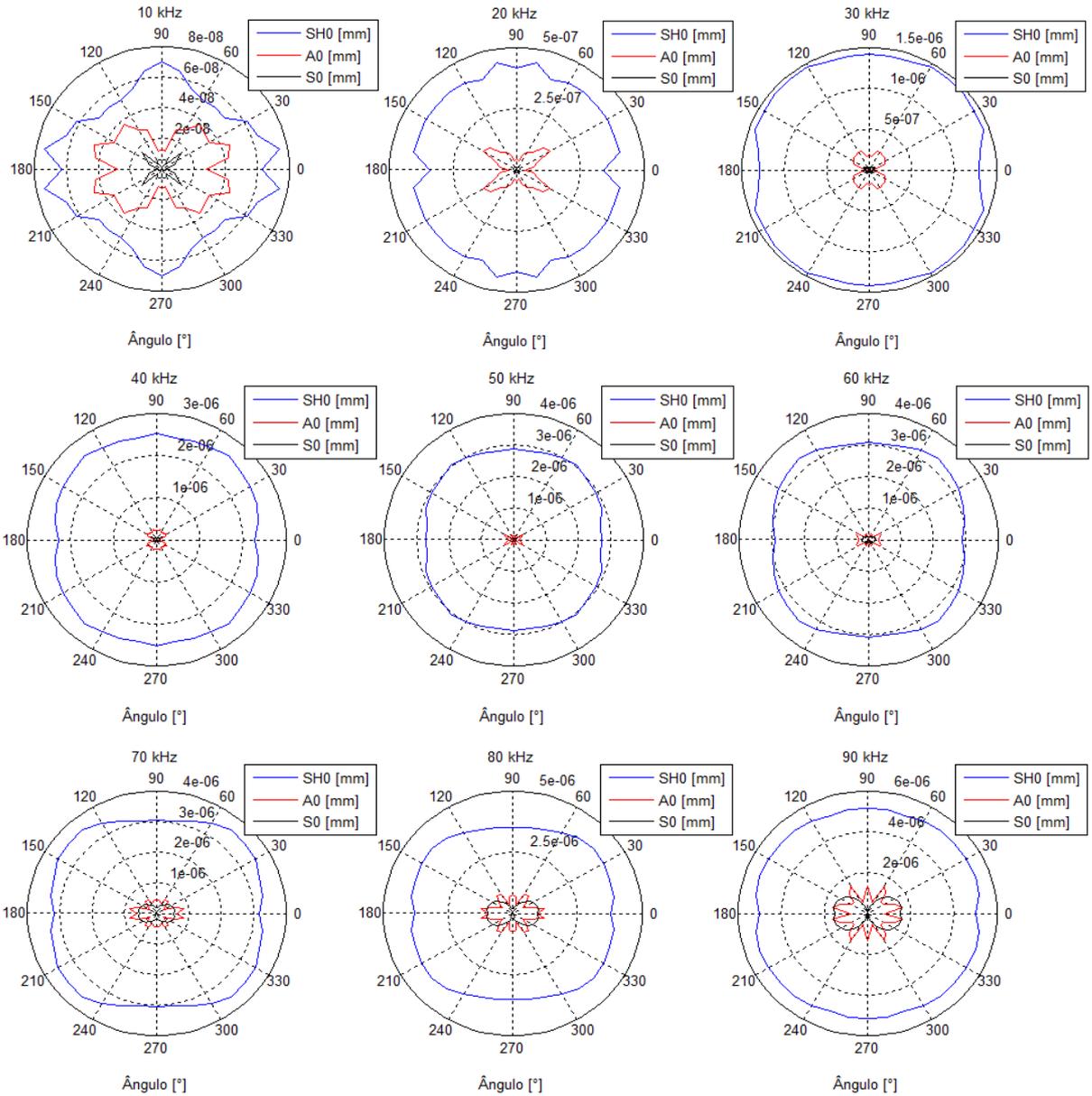
WILCOX, P. D. **Lamb Wave Inspection of Large Structures Using Permanently Attached Transducers**. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine – University of London, London, 1998.

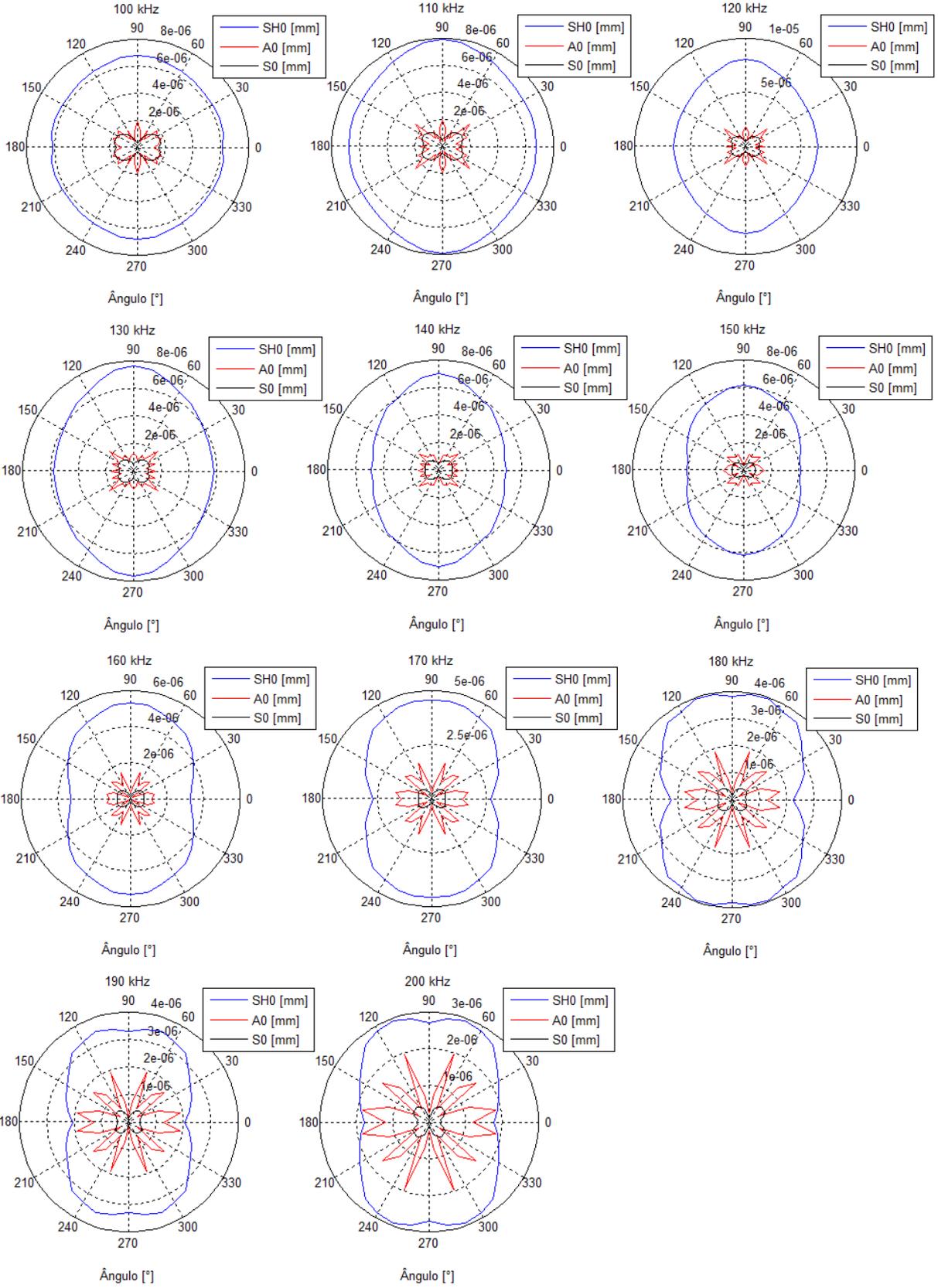
WILCOX, P. D. Omni-Directional Guided Wave Transducer Arrays for the Rapid Inspection of Large Areas of Plate Structures. **IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 50, n. 6, p. 699-709, Jun. 2003.

WILCOX, P. D., LOWE, M. J. S, CAWLEY, P. Mode and Transducer Selection for Long Range Lamb Wave Inspection. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v.12, p.553-565, Ago. 2001.

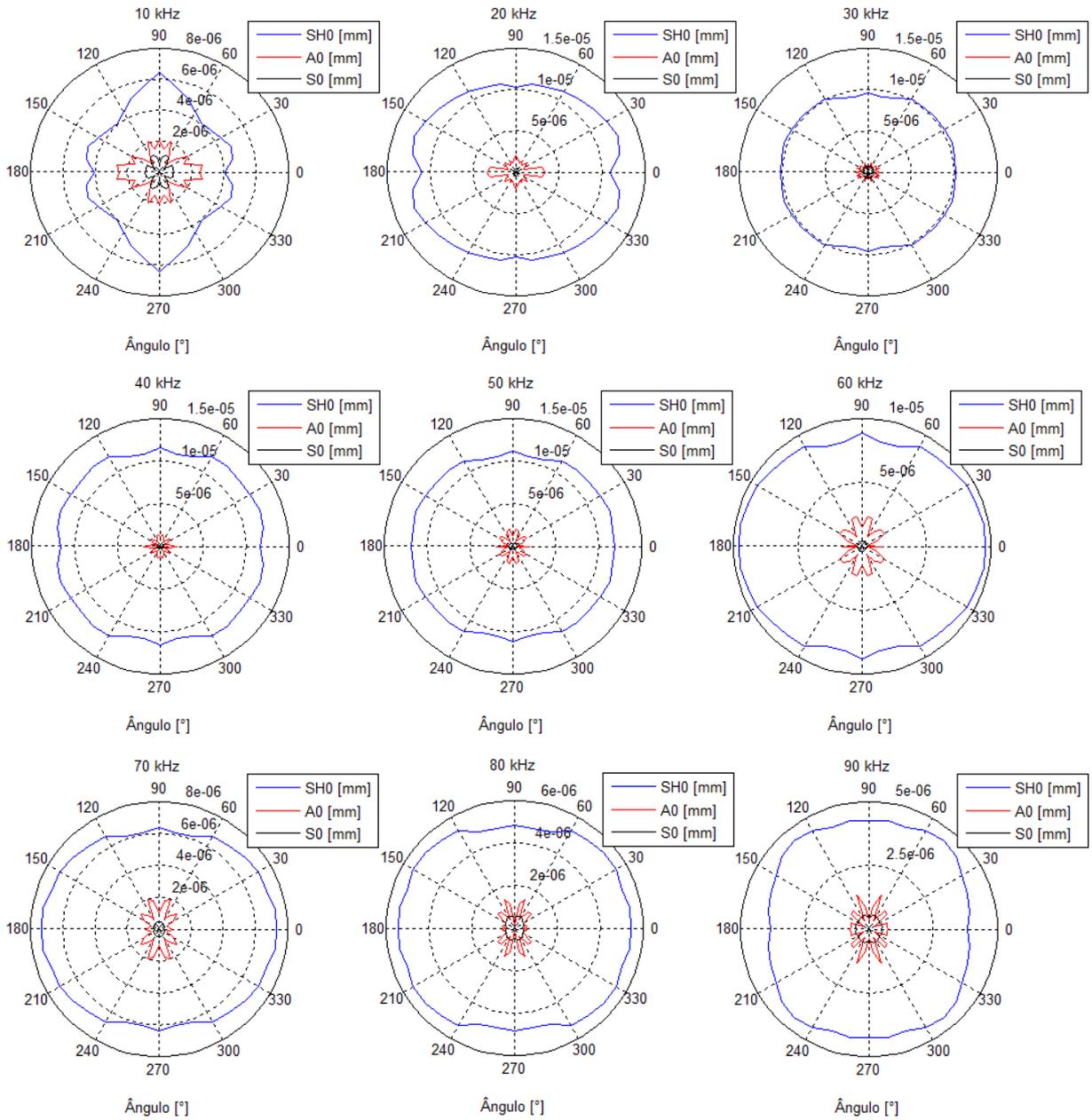
WORDEN, K. et al. The fundamental axioms of structural health monitoring. **Proceedings of The Royal Society A**, v. 463, p. 1639-1664, Abr. 2007.

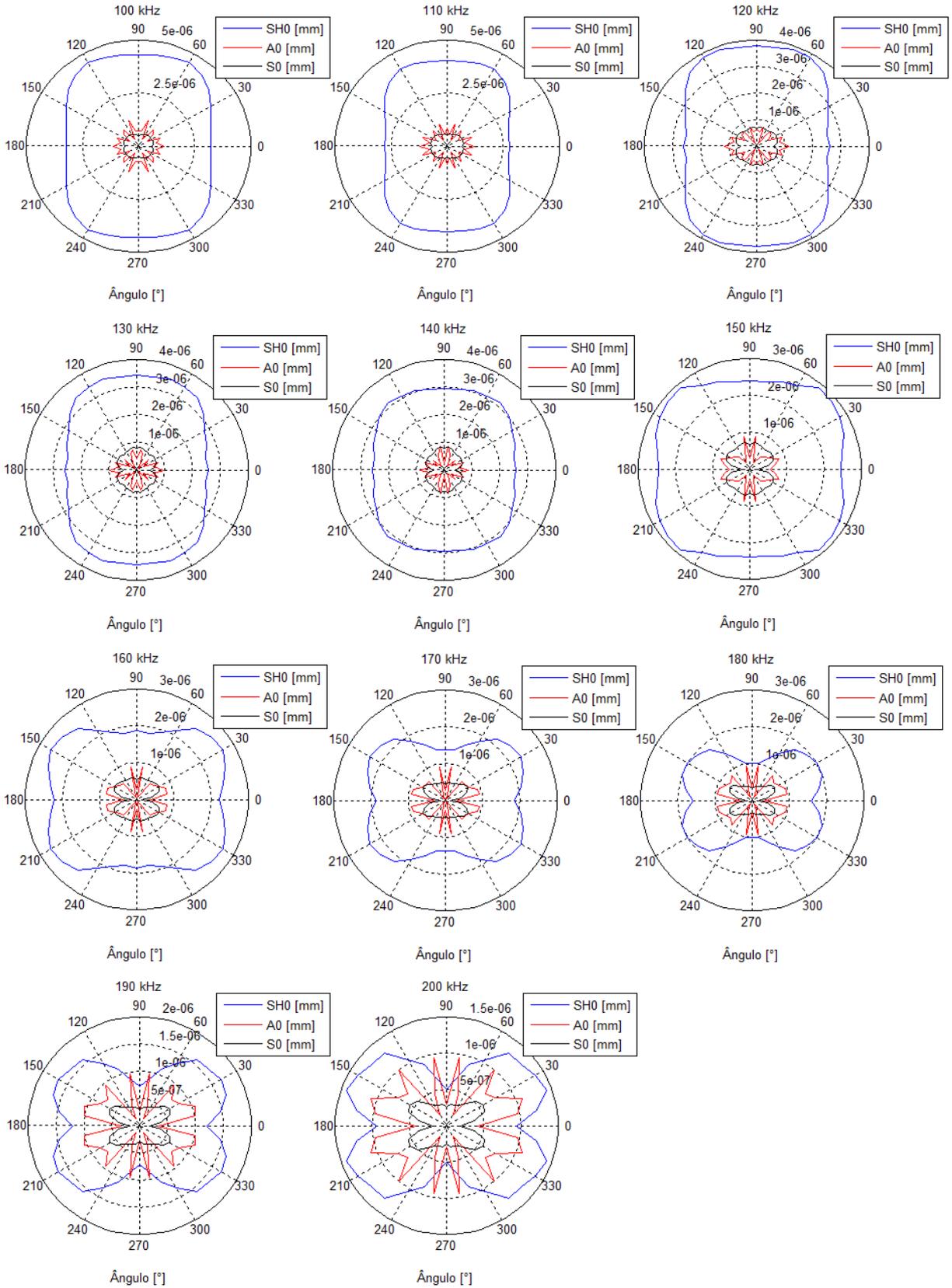
APENDICE A – GRÁFICOS DE DIRECIONALIDADE PARA EMISSÃO DO TRANSDUTOR MODELO 1



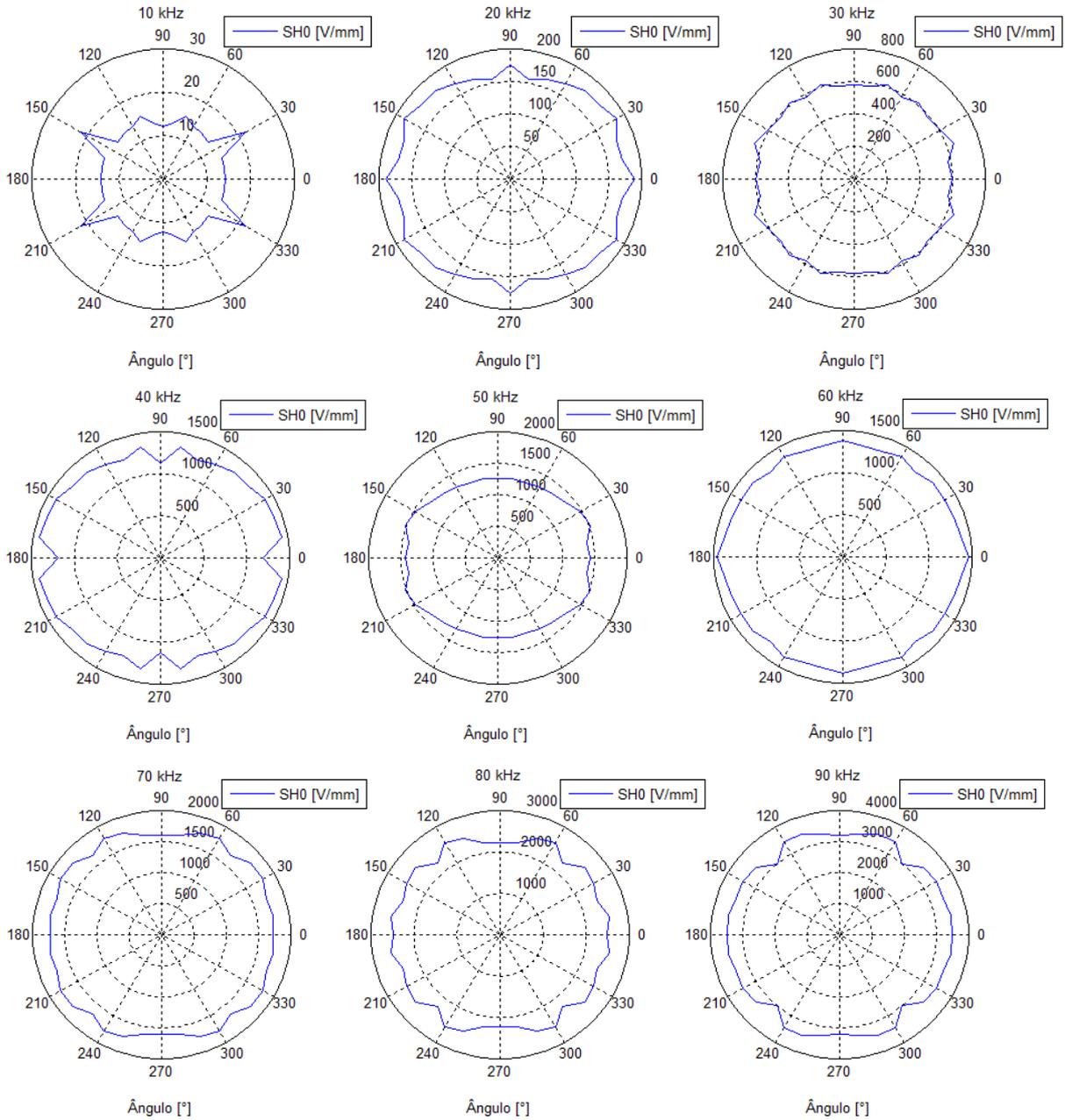


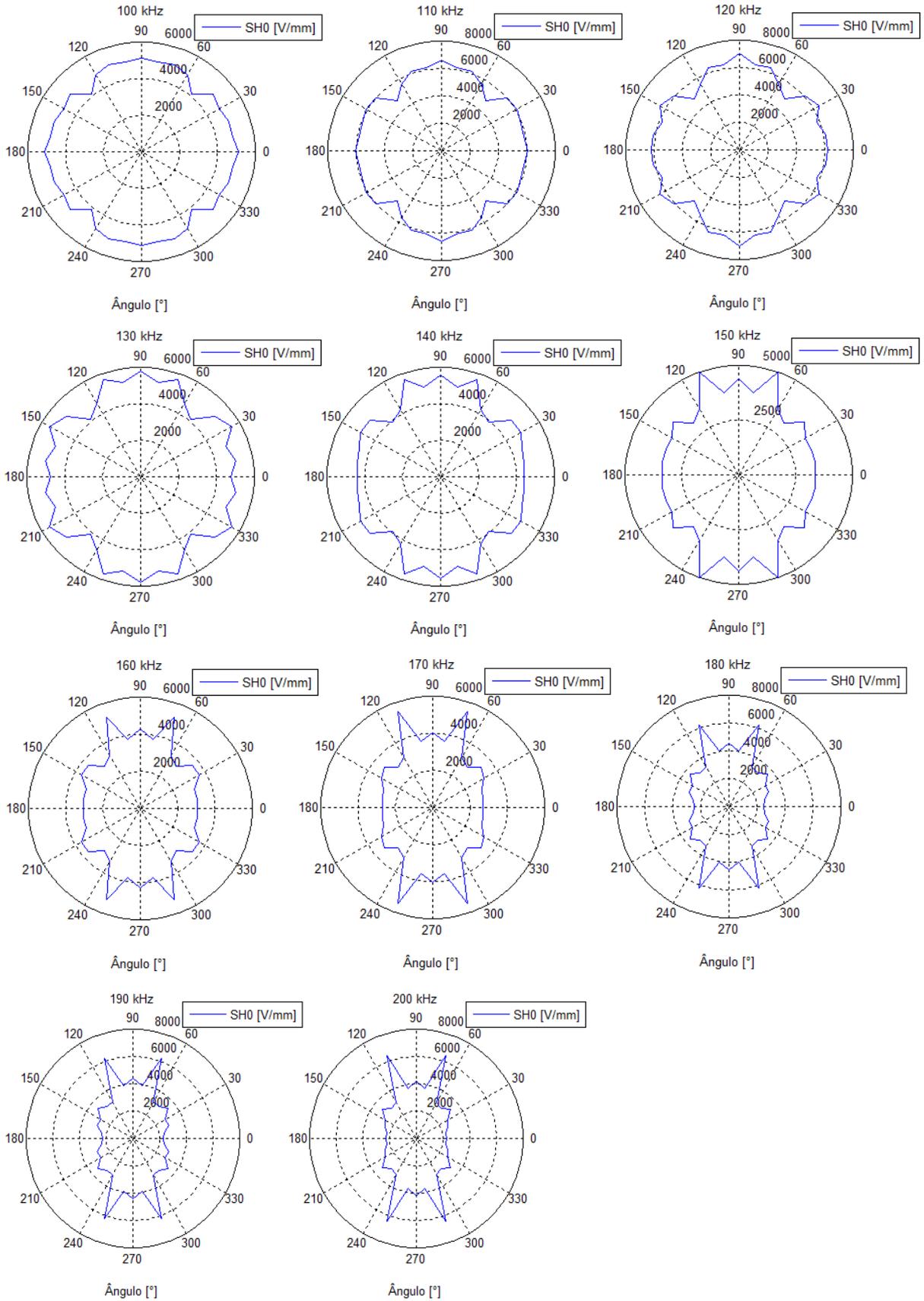
APENDICE B – GRÁFICOS DE DIRECIONALIDADE PARA EMISSÃO DO TRANSDUTOR MODELO 2





APENDICE C – GRÁFICOS DE DIRECIONALIDADE PARA RECEPÇÃO DO TRANSDUTOR MODELO 1





APENDICE D – GRÁFICOS DE DIRECIONALIDADE PARA RECEPÇÃO DO TRANSDUTOR MODELO 2

