



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC)
Departamento de Engenharia Biomédica (DEB)

Dissertação de Mestrado

**Desenvolvimento de um Protocolo para
Construção e Caracterização de Transdutores de
Ultra-som**

Valéria Monteiro do Nascimento

Campinas - SP
Fevereiro – 2003



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC)
Departamento de Engenharia Biomédica (DEB)

**Desenvolvimento de um Protocolo para
Construção e Caracterização de Transdutores de
Ultra-som**

Autora: Valéria Monteiro do Nascimento
Orientador: Vera Lúcia da Silveira Nantes Button

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do
Título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Campinas - SP
Fevereiro – 2003

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC)
Departamento de Engenharia Biomédica (DEB)

Dissertação de Mestrado

Desenvolvimento de um Protocolo para Construção e Caracterização de Transdutores de Ultra-som

Autora: Valéria Monteiro do Nascimento
Orientador: Vera Lúcia da Silveira Nantes Button

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dra. Vera Lúcia da Silveira Nantes Button
DEB/FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Eduardo Tavares Costa
DEB/ FEEC/UNICAMP

Joaquim Miguel Maia
CEFET - PR

Francisco José Arnold
CESET/UNICAMP

Campinas-SP
Fevereiro-2003

Agradecimentos

Agradeço a Deus, aos meus pais David Geraldo do Nascimento e Maria Laide Monteiro do Nascimento e minhas irmãs, pelo apoio.

Agradeço a orientação da Prof^a Dra. Vera Lúcia da Silveira Nantes Button pela oportunidade.

Aos amigos pela solidariedade e compreensão.

Aos amigos do DEB/CEB, pelo companheirismo e o auxílio nas horas de aperto.

Aos técnicos, funcionários e estagiários do CEB, e às técnicas da FEM, Claudinete e Rita, pelo apoio.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

O objetivo deste trabalho, definindo um protocolo para construção e caracterização de transdutores ultra-sônicos com elemento piezoelétrico único, foi estabelecer um procedimento adequado de construção e de testes destes transdutores no Laboratório de Ultra-Som (LUS). Todas as etapas de construção foram documentadas: primeiramente a obtenção das curvas de módulo e fase da impedância das cerâmicas em função da frequência, o que possibilitou identificar os modos de vibração e calcular o coeficiente de acoplamento eletromecânico destes modos para a cerâmica vibrando livremente; em seguida os transdutores foram construídos com três composições diferentes para a camada de retaguarda (epóxi e alumina; epóxi e tungstênio; epóxi, alumina e tungstênio) e duas espessuras distintas para a camada de acoplamento acústico ($\lambda/4$ e $3\lambda/4$); e por último foram realizadas medidas para caracterizar o transdutor, segundo normas internacionais vigentes. Após cada etapa de montagem dos transdutores foram traçadas as curvas de Módulo e Fase de Impedância *versus* Frequência, para determinar os efeitos de cada etapa da construção no desempenho final do transdutor, e para comparar os valores dos coeficientes de acoplamento eletromecânico dos modos de vibração da cerâmica livre com os do transdutor sendo montado. Este acompanhamento dos modos de vibração ao longo das etapas de construção dos transdutores permitiu detectar problemas em uma etapa específica e eventualmente corrigi-los antes da montagem final dos transdutores. Os testes realizados para avaliar o desempenho dos transdutores incluíram a determinação da resposta em frequência (espectro de frequências, frequência central e de pico, largura da faixa de passagem, medidos para os pulsos acústicos gerados e em pulso-eco para os ecos refletidos por alvo plano), a determinação de parâmetros do eco refletido por alvo plano localizado em z_n (resolução axial, perdas por inserção, forma de onda, *ringdown*); e mapeamentos do campo acústico gerado (profundidade e largura do campo, área ativa, espalhamento do feixe, perfil transversal e axial). A metodologia de realização dos testes, para determinar os parâmetros mais importantes no desempenho final dos transdutores, foi obtida em normas específicas para transdutores de ultra-som. Com estes testes foi possível avaliar quais parâmetros são ou não afetados pela diferença de composição e impedância acústica da camada de retaguarda, pela diferença de espessura da camada de compatibilização acústica, e pelo acoplamento elétrico dos transdutores. A área ativa, por exemplo, não apresentou variação significativa em função das camadas de retaguarda e de acoplamento acústico; os transdutores com camada de acoplamento acústico de espessura $\lambda/4$ apresentaram perdas por inserção menores e largura de banda maiores que aqueles com espessura $3\lambda/4$ (com exceção daqueles construídos com retaguarda de epóxi e alumina); a compatibilização elétrica dos transdutores não afetou a largura nem a profundidade do contorno de campo acústico de intensidade 3dB abaixo da intensidade máxima, mas aumentou a largura de banda e reduziu o *ringdown* dos transdutores. Os resultados de alguns parâmetros medidos não foram conclusivos sobre qual aspecto da construção é o melhor, para se obter uma dada característica desejada de desempenho do transdutor.

Abstract

The objective of this work, describing a protocol for construction and characterization of ultrasonic transducers with single piezoelectric element, was to establish an adequate procedure of construction of these transducers in the Ultrasound Laboratory (LUS). All the stages of construction had been registered: first the attainment of the module and phase curves of the impedance of ceramics as a function of frequency, making it possible to identify the modes of vibration and to calculate their electromechanical coupling factor for ceramics vibrating freely; after that the transducers had been constructed with three different compositions for the backing layer (epoxy and alumina; epoxy and tungsten; epoxy, alumina and tungsten) and two distinct thickness for the matching layer ($\lambda/4$ and $3\lambda/4$); finally it has been carried out measurements to characterize the transducer according to international standards. After each stage of the transducers assembly it has been traced the module and phase of impedance versus frequency curves to determine the effect of each stage of the construction in the final performance of the transducers and also to compare the values of electromechanical coupling factor in the modes of vibration of free ceramics with the ones of the constructed transducers. This accompaniment of the modes of vibration during all the stages of construction of the transducers allowed detecting problems in a specific stage and to correct them before the final assembly of the transducers. The tests carried out to evaluate the final performance of the transducers included the determination of parameters of the pulse/echo response (axial resolution, insertion loss, waveform, ringdown), the frequency response (frequency spectra, central frequency, peak frequency and bandwidth), and the parameters of the generated acoustic field mappings (depth and width of the field, aperture size, beam spread, axial and transverse profiles). The methodology for the accomplishment of the tests, in order to determine the most important parameters in the final performance of the transducers, was that described in specific standards for ultrasonic transducers. With these tests it was possible to evaluate which parameters are affected or not by the difference in composition and acoustic impedance of the backing layer, by the difference of thickness of the matching layer, and by the electric coupling of the transducers. The aperture size, for example, did not present significant variation as a function of the backing and matching layers; the transducers with matching layer of thickness $\lambda/4$ presented lesser insertion loss and larger bandwidth than those with thickness $3\lambda/4$ (with exception of those constructed with backing layer of epoxy and alumina); the electrical matching of the transducers did not affect the bandwidth nor the depth of the acoustic field (measured as the intensity contour 3dB below the maximum field intensity), but increased the bandwidth and reduced the ringdown of the transducers. The results of some measured parameters had not been conclusive on which aspect of the construction is the best to reach a given characteristic for a desired performance of the transducer.

ÍNDICE

	Página
Capítulo I - Introdução	01
Capítulo II – Fundamentos Teóricos	07
II.1. Transdutor Ultra-sônico	07
1.a. Componentes do Transdutor	08
a.1. Elemento ativo	08
a.2. Camada de retaguarda	12
a.3. Camada de compatibilização acústica	15
a.4. Compatibilização elétrica	18
a.5. Revestimento	20
a.6. Focalização	20
1.b. Circuitos Equivalentes	21
II.2. Características de um Transdutor Ultra-sônico	21
2.a. Fator Q de um transdutor ultra-sônico	21
2.b. Resolução Axial	24
2.c. Resolução Lateral	25
2.d. Focalização de lentes	26
2.e. Sensibilidade do transdutor ultra-sônico	27
2.f. Padrão do Campo Acústico	28
Capítulo III - Materiais e Métodos	31
III.1. Construção de Transdutores	32
1.a. Documentação dos modos de vibração das cerâmicas	32
1.b. Contato elétrico da face negativa	33
1.c. Camada de retaguarda	35
c.1. Camada de retaguarda de epóxi e pó de alumina.....	36
c.2. Camada de retaguarda de epóxi e pó de tungstênio	37
c.3. Camada de retaguarda de epóxi com pó de alumina e pó de tungstênio	38
c.4. Impedância Acústica da camada de retaguarda	39

1.d. Aterramento da cerâmica	41
1.e. Compatibilização elétrica	41
1.f. Revestimento externo	42
1.g. Camada de acoplamento acústico	43
1.h. Colocação do cabo e conector BNC	44
III.2. Caracterização dos transdutores	48
2.a. Medidas de resposta em frequência	51
a.1. Medida da largura de faixa	52
2.b. Características do Pulso Acústico	53
b.1. Pulso Acústico Gerado pelos Transdutores	53
b.2. Pulso Acústico Medido em Pulso-Eco	53
b.3. Sensibilidade Relativa em Pulso-Eco	54
b.4. Medição do <i>Ringdown</i>	54
b.6. Resolução Axial	55
2.c. Medidas dos parâmetros do campo ultra-sônico	55
c.1. Medidas em Pulso-Eco	57
c.2. Medidas com hidrofone no modo transmissão/recepção	57
c.3. Área Ativa	59
c.4. Perfil transversal do campo acústico	59
c.5. Perfil axial do campo acústico	60
c.6. Espalhamento do Campo.....	60
2.d. Testes com o transdutor após a colocação do indutor	61
2.e. Observações	62
 Capítulo IV – Resultados	 63
IV.1. Construção dos Transdutores	63
1.a. Documentação das cerâmicas piezoelétricas	63
1.b. Documentação das fases de construção dos transdutores de ultra-som	63
b.1. Acoplamento elétrico dos transdutores	66
b.2. Coeficiente de acoplamento eletromecânico	68
b.3. Impedância acústica	70

IV.2. Caracterização dos Transdutores	71
2.a. Resposta em frequência	71
2.b. Parâmetros avaliados a partir da forma do pulso acústico gerado ou do eco recebido	80
b.1. <i>Ringdown</i>	80
b.2. Medida da sensibilidade relativa ou perdas por inserção	81
b.3. Medida da resolução axial	82
2.c. Parâmetros avaliados a partir do mapeamento do campo acústico	84
c.1. Área ativa	84
c.2. Perfil transversal do campo acústico.....	84
c.3. Perfil axial do campo acústico	90
c.4. Espalhamento do feixe	98
 Capítulo V – Conclusão e Discussão	 101
 Capítulo VI – Referências Bibliográficas	 107
 Apêndice A	 113
Apêndice B	132
Apêndice C	143
Apêndice D	154

Lista de Ilustrações

Lista de Figuras

Figura II.1 – Componentes de um transdutor ultra-sônico	8
Figura II.2 – Eixos vibração e modo vibração radial e espessura	9
Figura II.3 – Circuito equivalente de Mason simplificado	11
Figura II.4 – Onda ultra-sônica com um ângulo de incidência α sendo transmitida, e refratada	14
Figura II.5 – Inserção de uma camada de compatibilização acústica	16
Figura II.6 – Formato simplificado do campo ultra-sônico de um transdutor piezoelétrico.	28
Figura II.7 - Pressão acústica no campo próximo	30
Figura III.1 – Curvas de módulo e fase da impedância para o modo radial e o modo espessura de vibração da cerâmica	34
Figura III.2 – Fio soldado perpendicularmente à face da cerâmica	35
Figura III.3 – Micrometro digital e acessórios para determinar a espessura da camada de acoplamento acústico	44
Figura III.4 – Esquema de construção de um transdutor de ultra-som de elemento único ..	45
Figura III.5 – Foto com as etapas de construção de um transdutor de ultra-som de elemento único de disco de cerâmica piezoelétrica	45
Figura III.6 - Curva de módulo da impedância versus frequência	46
Figura III.7 – Curva de fase da impedância versus frequência	46
Figura III.8 – Sistema de mapeamento do campo acústico	50
Figura III.9 - Separação entre campo próximo e campo distante a partir da face do transdutor	55

Figura III.10 – Diagrama de ligação em pulso-eco	57
Figura III.11 – Esquema de ligação em transmissão/recepção	58
Figura III.12 - Figura da determinação do espalhamento do feixe	61
Figura IV.1 – Curvas de módulo e fase da impedância <i>versus</i> frequência antes e depois do acoplamento elétrico	68
Figura IV.2 – Pulsos acústicos gerados pelos transdutores com camada de retaguarda de epóxi e alumina e captados por hidrofone pontual de PVDF	74
Figura IV.3 - Pulsos acústicos gerados pelos transdutores com camada de retaguarda de epóxi, alumina e tungstênio e captados por hidrofone pontual de PVDF	75
Figura IV.4 – Pulsos acústicos gerados pelos transdutores com camada de retaguarda de epóxi e tungstênio e captados por hidrofone pontual de PVDF	76
Figura IV.5 – Resposta em pulso-eco gerada por um refletor plano com e sem indutor; e espectro de frequências, largura de faixa, frequência central e de amplitude máxima do sinal do transdutor	79
Figura IV.6 – Ecos obtidos para avaliação de resolução axial	83
Figura IV.7 – Perfil transverso do campo acústico dos transdutores com camada de retaguarda de epóxi e alumina, medido em z_n e $2z_n$	87
Figura IV.8 - Perfil transverso dos transdutores com camada de retaguarda de epóxi, pó de alumina e pó de tungstênio, medido em z_n e $2z_n$	88
Figura IV.9 - Perfil l transverso dos transdutores com camada de retaguarda de epóxi e pó de tungstênio, medido em duas distâncias, z_n e $2z_n$	89
Figura IV.10 - Perfil axial dos campos acústicos gerados por transdutores com camada de retaguarda de epóxi e pó de alumina	91
Figura IV.11 - Perfil axial dos campos acústicos gerados por transdutores com camada de	

retaguarda de epóxi, pó de alumina e pó de tungstênio	92
Figura IV.12 - Perfil axial dos campos acústicos gerados por transdutores com camada de retaguarda de epóxi e pó de tungstênio	93
Figura IV.13 – Representação 2D do mapeamento do campo acústico no plano XY dos transdutores com camada de retaguarda de epóxi e alumina	95
Figura IV.14 – Representação 2D do mapeamento do campo acústico no plano XY dos transdutores com camada de retaguarda de epóxi, alumina e tungstênio ...	96
Figura IV.15 – Representação 2D do mapeamento do campo acústico no plano XY dos transdutores com camada de retaguarda de epóxi e tungstênio	97
Figura IV.16 - Perfil Axial do transdutor #2 com e sem indutor	98
Fluxograma - Passos de construção de um transdutor de ultra-som com discos de cerâmicas piezoelétricas	47

Lista de Siglas

BaTiO₃ - titanato de bário

PZT - titanato zirconato de chumbo

PVDF – material piezoelétrico

FWB - faixa de passagem

LUS - Laboratório de Ultra-Som

DEB - Departamento de Engenharia Biomédica

FEEC - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

CEB - Centro de Engenharia Biomédica

PZT-5A - tipo de cerâmica piezoelétrica

PVC - material constituinte do tubo

BW - largura de faixa

IL - insertion loss

Lista de Símbolos

W - tungstênio

Al – alumínio

Cu – cobre

Pb – chumbo

Sn – estanho

λ - comprimento de onda

D - diâmetro

E - espessura

k_p - coeficiente de acoplamento piezoelétrico

k_{ef}^2 - coeficiente efetivo de acoplamento piezoelétrico

f_{ar} - frequência de anti-ressonância

f_r - frequência de ressonância

N_p - constante de frequência do modo radial

N_T - constante do modo espessura

f - frequência

Z – impedância

ρ - densidade

c – velocidade

R - energia acústica refletida

Z_T - transdutor de impedância

Z_M - impedância do meio de transmissão

Z_C - impedância da camada de compatibilização acústica

R_r - valor de impedância na frequência de ressonância

C_r - capacitância série na ressonância

L_r - indutância série na ressonância

C_0 - capacitância elétrica ou intrínseca da cerâmica

R_0 - perdas elétricas na cerâmica

ω - frequência angular

Δf - largura da faixa de passagem ou de -3 dB

Q - fator de qualidade

RA - resolução axial

t' - tempo efetivo de duração do pulso

LR - resolução lateral

d - diâmetro do ponto focal

l_f - comprimento focal

S_{rel} - sensibilidade relativa

V_e - tensão de resposta pico a pico

V_a - tensão pico a pico aplicada

f_{nom} - frequência nominal

n - número de meios ciclos

f_c - frequência central

z_n - distância de transição entre o campo próximo campo distante

2ψ - espalhamento do feixe

z_a - distância além da transição entre campo próximo e campo distante

z_c - distância determinada além de

W - medida do aumento da largura do campo ultra-sônico

k - acoplamento eletromecânico

Lista de Tabelas

Tabela III.1 - Valores da densidade da camada de retaguarda de epóxi e pó de alumina para cada transdutor	37
Tabela III.2 - Valores da densidade da camada de retaguarda de epóxi e pó de tungstênio para cada transdutor	38
Tabela III.3 - Valores da densidade da camada de retaguarda de epóxi, pó de alumina e pó de tungstênio para cada transdutor	39
Tabela III.4 – Impedância acústica	40
Tabela III.5 – Valores dos indutores	42
Tabela IV.1 – Frequências de ressonância e anti-ressonância e coeficiente de acoplamento dos modos de vibração de cada cerâmica vibrando livremente	64
Tabela IV.2 – Frequências de ressonância e anti-ressonância e coeficiente de acoplamento dos modos de vibração dos transdutores	65
Tabela IV.3 – Valores dos indutores calculados e usados na montagem dos transdutores ..	67
Tabela IV.4 – Valor do coeficiente de acoplamento eletromecânico do modo espessura para os transdutores construídos com e sem indutor	70
Tabela IV.5 – Valores das impedâncias acústicas das três composições da camada de	

retaguarda	70
Tabela IV.6 – Largura de faixa dos pulsos acústicos gerados pelos transdutores e medidos por hidrofone de PVDF	73
Tabela IV.7 – Faixa de passagem dos transdutores com e sem indutor	77
Tabela IV.8 – Valores de <i>ringdown</i> medidos para cada transdutor com e sem indutor	81
Tabela IV.9 - Valor da perda por inserção (<i>IL</i>) para os transdutores construídos.....	82
Tabela IV.10 - Valor da área ativa medida para os transdutores construídos.....	84
Tabela IV.11 - Valor da intensidade relativa do perfil transversal do campo acústico dos transdutores construídos medida a cinco distâncias da face do transdutor....	86
Tabela IV.12 – Valores da amplitude máxima do perfil axial do campo acústico, da profundidade e da largura da linha de contorno de -3dB.....	94
Tabela IV.13 – Valores do espalhamento do feixe (2ψ) para cada transdutor.....	99
Tabela V.1. Resultados da Caracterização dos transdutores construídos	105

I. Introdução

O transdutor ultra-sônico é um dos componentes críticos de um equipamento de diagnóstico médico de imagem por ultra-som. Os transdutores ultra-sônicos são encarregados de transformarem os pulsos elétricos gerados pelo equipamento em pulsos acústicos que se propagam nos tecidos, e também de transformarem os ecos do sinal acústico emitido que neles incidem em sinais elétricos que são processados e utilizados para reconstruírem a imagem do meio.

A transformação de energia elétrica em energia mecânica e vice-versa é feita por um ou por múltiplos elementos piezoelétricos, usualmente de cerâmica ferroelétrica do tipo BaTiO₃ (titanato de bário) ou PZT (titanato zirconato de chumbo). Também são utilizados transdutores compostos de cerâmica piezoelétrica e de polímeros (compósitos).

A maioria dos transdutores usados em medicina emprega discos finos ou pratos de cerâmicas piezoelétricas, onde o diâmetro é maior que a espessura.

Um bom transdutor deve ter as seguintes características:

- Deve medir com precisão a magnitude do fenômeno físico.
- Deve reproduzir com precisão o evento físico em relação ao tempo.
- Deve reproduzir com precisão toda a gama de frequências do fenômeno sem alterar ou reduzir parte do espectro de interesse.
- Deve ser capaz de suprir um sinal de saída compatível com as condições de sinais exigidas pelo equipamento, sem alterar as características do evento original.
- Deve ser de construção robusta e de fácil operação de modo a não sofrer danificação ou alterar suas características quando utilizado por pessoal inexperiente.

Muitos fatores, incluindo o material, a construção mecânica e o acoplamento elétrico e as condições de carga mecânica e elétrica externas, influenciam o comportamento do transdutor. A construção mecânica é o fator que mais influencia o desempenho do transdutor, em parâmetros importantes como a área da superfície que irá irradiar o campo acústico, o amortecimento mecânico e isolamento elétrico.

Para entender o funcionamento de transdutores ultra-sônicos construídos com cerâmicas piezoelétricas, encontram-se na literatura descrições detalhadas do fenômeno de piezoeletricidade, das equações e constantes que descrevem este fenômeno, dos materiais que possuem a propriedade da piezoeletricidade, das suas aplicações, dentre elas como um transdutor de sinais acústicos, das definições do coeficiente de acoplamento eletromecânico, e das frequências de ressonância e anti-ressonância, Cady (1964); Lines e Glass (1977); IEEE Standard on Piezoelectricity (1978); Hunt, Arditi e Foster (1983); Gallego (1989); Guo e Cawley (1991); Arnold (1995); Button (1998); Geng e Zhang (1998).

Também são encontradas na literatura as descrições do funcionamento de transdutores ultra-sônicos para imagens médicas, as várias formas de construção e os parâmetros envolvidos nas principais características e no desempenho destes transdutores Desilets, Fraser e Kino (1978); Hunt, Arditi e Foster (1983); Person e Hertz (1985); Brittain e Weight (1987); Gallego (1989); Medina (1989); Mitra e Saksena (1997); Grego, Pereira e Machado (1997); Button (1998); Alves, Ritter e Shung (2000). Lang (1989) apresenta um transdutor ultra-sônico híbrido, onde a cerâmica piezoelétrica se comporta como transmissor e um filme de PVDF é o elemento receptor.

O comportamento de um transdutor ultra-sônico pode ser representado por circuitos elétricos. Kossoff (1966) descreveu um circuito equivalente ao transdutor operando no

modo de vibração em espessura, com seis terminais, onde um par representa os terminais elétricos e os outros dois pares representam a carga mecânica nas faces do transdutor; Martin e Sigelmann (1975) representaram um transdutor piezoelétrico por seu circuito equivalente Thevènin; Souquet, Defranould e Desbois (1979) descreveram o circuito equivalente de Mason para um transdutor ultra-sônico com camada de retaguarda de ar; Hunt, Arditi e Foster (1983) apresentaram o circuito equivalente de Mason simplificado e descreveram o transdutor piezoelétrico como um transformador eletromecânico ideal de razão 1:N, conectando a entrada elétrica e a saída mecânica; Church e Pincock (1985) descreveram uma adaptação do modelo de Mason considerando as perdas mecânicas e a dependência das propriedades elétricas com a frequência, para representar um disco fino de cerâmica vibrando no modo radial; Desilets, Fraser e Kino (1978), descreveram o modelo KLM que representa o transdutor de ultra-som como uma linha de transmissão que foi apresentado originalmente por Krimholtz, Leedom e Mathaei (1970).

O comportamento da camada de retaguarda de um transdutor ultra-sônico é apresentado na literatura em diversos artigos. Em Kossoff (1966) é apresentada uma camada de retaguarda composta de epóxi e alumina; Martin e Sigelmann (1975), Hunt, Arditi e Foster (1983) descreveram o efeito desta camada de uma forma generalizada; Cohen, Stubbs e Hoppe (1984) estudaram o efeito de uma camada de retaguarda composta por uma mistura de vários materiais como epóxi e pó de tungstênio (W), misturas com epóxi e outros metais como estanho (Sn), chumbo (Pb) ou cobre (Cu), misturas de W/Cu/InPb50-50; Sayers e Tait (1984) estudaram as propriedades acústicas da camada de retaguarda, como a velocidade de propagação, a densidade e a impedância acústica, para vários materiais (epóxi, W, Al, Cu, Pb, Sn) e também para misturas destes materiais, como epóxi e tungstênio, tungstênio e cobre, tungstênio e alumínio, tungstênio e chumbo, e

tungstênio e estanho; Alves, Ritter e Shung (2000) estudaram a impedância acústica da camada de retaguarda resultante da utilização de várias misturas como: epóxi, epóxi e pó de Al_2O_3 , e epóxi e pó de tungstênio, usadas na construção de transdutores de ultra-som cujo elemento ativo era um filme de PVDF; Pereira, Glória e Machado (1996) propuseram um transdutor ultra-sônico com duas camadas de retaguarda sendo a primeira uma camada de retaguarda de forma cônica, acoplada a uma segunda camada, para promover a total absorção do pulso ultra-sônico transmitido para o interior do transdutor.

O efeito da camada de acoplamento acústico de um transdutor ultra-sônico foi descrito na literatura, a partir da teoria de uma linha de transmissão, por Martin e Sigelmann (1975), Desilets, Fraser e Kino (1978); no relatório técnico da Aero-tech (1978) são descritos o funcionamento, a propagação e a aplicação da camada de acoplamento acústico construída com espessura igual a $\lambda/4$ ou múltiplos ímpares de $\lambda/4$; já no relatório técnico de 1980 Aero-tech (1980 a) é descrita a utilização de múltiplas camadas de acoplamento acústico com espessura igual a $\lambda/4$ e seu efeito em aumentar a largura da faixa de passagem em relação à utilização de uma única camada de acoplamento acústico; Hunt, Arditi e Foster (1983) estudaram os efeitos da camada de acoplamento acústico com espessura $\lambda/4$ e a impedância de alguns materiais que compunham esta camada (Plexiglass, vidro, epóxi); Inoue, Ohta e Takahashi (1987) estudaram os valores ótimos para as camadas de acoplamento acústico e apresentaram a teoria de síntese de filtros de múltiplos modos; Medina (1989) estudou o efeito de duas camadas de acoplamento acústico com impedâncias acústicas intermediárias entre a da cerâmica piezoelétrica e a do tecido biológico; Seyed-Boloforosh (1995) estudou uma camada de compatibilização acústica obtida a partir de uma série de micro ranhuras na face da cerâmica.

Para minimizar as perdas e aumentar o coeficiente de acoplamento eletromecânico de transdutores ultra-sônicos de alta frequência, Lockwood, Turnbull e Foster (1994) desenvolveram uma técnica que possibilitou construir transdutores ultra-sônicos focalizados, com cerâmicas piezoelétricas que eram encurvadas, formando uma lente focalizadora.

Desde 1989 alunos e docentes do Departamento de Engenharia Biomédica (DEB da FEEC, UNICAMP) vêm desenvolvendo pesquisas que incluem a construção e a caracterização de transdutores piezoelétricos. Até então, estes transdutores eram construídos com recursos do Laboratório de Ultra-Som (LUS) e o empréstimo de recursos complementares (equipamentos) de outros laboratórios. O *know-how* da construção e caracterização destes transdutores foi obtido a partir de visitas a laboratórios de outras instituições (COPPE-UFRJ e EP-USP) e da construção dos primeiros transdutores no LUS. O LUS consta hoje com todos os recursos necessários para a construção e a caracterização de transdutores de ultra-som de elemento único. Com a realização deste trabalho de mestrado, docentes e alunos do LUS passarão a dispor de um protocolo de construção e caracterização de transdutores de ultra-som, que indicará passo a passo as etapas necessárias para a construção de um transdutor, e também, quais e como fazer os testes mínimos que deverão ser realizados para a caracterização destes transdutores.

Para discriminar quais os testes que deveriam ser realizados para determinar o desempenho dos transdutores que foram construídos neste trabalho, foram consultadas algumas normas e referências bibliográficas para verificar como eram determinadas a resolução axial, a resolução lateral, e a sensibilidade (Aero-tech Reports, 1978 e 1979 b); IEC-1390, 1996); a forma de onda e o espectro de frequências em pulso-eco, as características focais do campo, sensibilidade relativa e largura de faixa (Aero-tech

Reports, 1980 b; IEC-1390, 1996); as perdas por inserção (Alves, Ritter e Shung, 2000; Lockwood, Turnbull e Foster, 1994); a resposta em frequência, largura de faixa (BW), sensibilidade relativa, área ativa, espalhamento do feixe, perfil transverso e axial (ASTM E-1065, 1999; AIUM, 1992; Alvarenga, Machado e Pereira; 2001; IEC-1157 1992; IEC-1088, 1991); e qual era o sistema mínimo em que um transdutor ultra-sônico deveria ser colocado para que se pudesse fazer as medidas do formato do perfil do campo acústico (Schafer e Lewin,1988; Button, 1998).

Objetivos deste trabalho:

1. Definir as etapas de construção de um transdutor de ultra-som com elemento único de discos de cerâmica piezoelétrica, a partir dos procedimentos previamente adotados no LUS.
2. Definir os procedimentos mínimos para a caracterização dos transdutores de ultra-som construídos no LUS, a partir de normas vigentes e de referências bibliográficas.
3. Determinar o efeito das camadas de retaguarda (“*backing*”) e de acoplamento acústico (“*matching*”) e do acoplamento elétrico nos principais parâmetros de desempenho de transdutores ultra-sônicos de elemento único.

II. Fundamentos Teóricos

II.1 Transdutor Ultra-sônico

Os transdutores ultra-sônicos são produzidos em várias configurações (elemento único, *arrays* lineares e circulares) para diferentes aplicações (imagens médicas, ensaios não-destrutivos), e para trabalhar em diversas frequências ultra-sônicas. O campo acústico gerado pelo transdutor é transmitido para qualquer meio de propagação de ultra-som e, sendo para o interior do corpo humano, ocorre por meio de um acoplamento e da superfície da pele e então se propaga através da estrutura a ser examinada. Quando a onda ultra-sônica encontra uma interface entre meios diferentes, como a parede de um órgão, parte da energia é refletida e parte é transmitida. Esta energia refletida é captada pelo transdutor, amplificada, processada e pode ser utilizada, por exemplo, para formar a imagem da estrutura sob exame.

Muitos fatores, incluindo o tipo de elemento transdutor, a construção mecânica, a compatibilização elétrica e as condições externas de cargas mecânica e elétrica, influenciam o comportamento de um transdutor. A construção mecânica influencia seu desempenho com parâmetros importantes tais como a área de superfície da radiação, o amortecimento mecânico, o encapsulamento, e outras variáveis da construção física.

A construção de um transdutor pode permitir que ele opere como dois transdutores, um receptor e um transmissor, que têm características de desempenho idênticas, ou seja, que ele tenha a mesma eficiência tanto operando como transmissor como operando como receptor.

II.1.a Componentes do Transdutor

A figura II.1 mostra os componentes de um transdutor ultra-sônico, e como estes estão dispostos no transdutor.

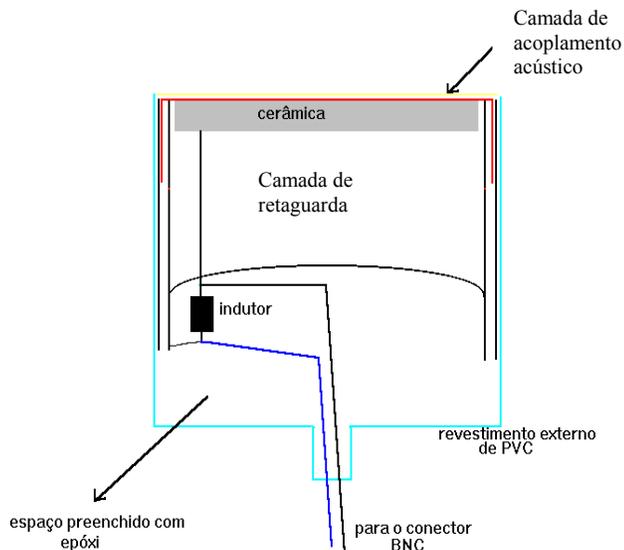


Figura II.1 Mostrando os componentes de um transdutor ultra-sônico.

II.1.a.1 Elemento ativo – O elemento transdutor ou elemento ativo é aquele que converte a excitação elétrica em campo acústico, na operação de transmissão, ou converte a pressão do som em sinal elétrico, operando como receptor.

Cerâmicas piezoelétricas são os elementos transdutores mais utilizados como detectores e geradores de potência acústica, para aplicações em alta frequência, que é o caso dos transdutores ultra-sônicos para aplicação médica.

O elemento ativo de um transdutor ultra-sônico básico é um disco de cerâmica piezoelétrica, com diâmetro maior que a espessura e com eletrodos metálicos depositados nas faces paralelas.

Normalmente, o disco de cerâmica é polarizado na direção do eixo 3 (Figura II.2 a), para vibrar preferencialmente no modo espessura, porém, quando a cerâmica é excitada

para vibrar num modo principal, parte da energia também é acoplada a outros modos. Em um disco de cerâmica piezoelétrica vibrando livre, os modos de vibração mais intensos são o modo espessura e o radial Guo e Cawley (1991).

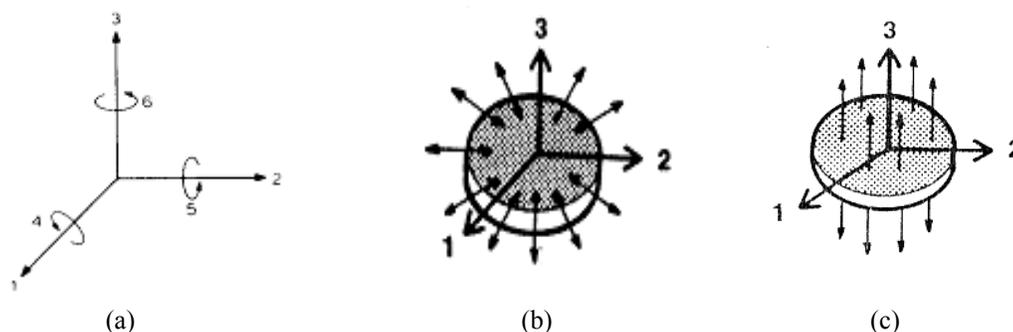


Figura II.2. Definição dos eixos de polarização ortogonais 1, 2 e 3 e indicação dos movimentos de cisalhamento 4,5 e 6 (a) e principais modos de vibração radial e espessura (b) disco de cerâmica piezoelétrica vibrando no modo radial e (c) no modo espessura.

Apesar de existirem outros modos de vibração em um material piezoelétrico, apenas os modos de vibração radial e espessura (Figura II.2 b) são significativos em um transdutor de ultra-som construído com um disco de cerâmica piezoelétrica.

A maioria das técnicas comumente usadas para análise de características de vibração de discos piezoelétricos é unidimensional e assume que o disco piezoelétrico vibra somente na direção da espessura como no movimento de um pistão plano: quando uma diferença de tensão elétrica é aplicada entre as duas faces da superfície do disco, através de eletrodos, o disco deforma-se na direção da espessura e as duas faces do disco permanecem planas durante a vibração IEEE Standard on Piezoelectricity (1978).

Quanto maior a relação diâmetro/espessura (D/E) do disco cerâmico, maior a separação entre o modo radial ou planar e o modo espessura e maior a semelhança de seu comportamento vibracional ao de um pistão plano.

O fator de acoplamento piezoeletrico (k_p) descreve tanto a conversão de energia eletro-mecânica quanto a conversão de energia mecânica em elétrica de um elemento transdutor, porém não representa necessariamente toda a eficiência do efeito piezoeletrico. O valor do fator de acoplamento depende das condições de contorno mecânicas: se o elemento transdutor tem suas bordas livres ou presas Hunt, Arditi e Foster (1983).

O coeficiente efetivo de acoplamento eletro-mecânico é obtido pela relação entre as frequências de ressonância e de anti-ressonância de um dado modo de vibração, sendo que, quanto maior a diferença entre estas frequências, mais acoplado se encontra este modo de vibração, tendo com isso, este modo, maior influência na forma de vibração final da cerâmica. Este coeficiente é representado matematicamente por:

$$k_{ef}^2 = \frac{f_{ar}^2 - f_r^2}{f_{ar}^2} \quad (2.1)$$

Onde: f_{ar} = frequência de anti-ressonância; e

f_r = frequência de ressonância

Usando o modelo simplificado de Mason (Figura II.3), que representa o comportamento do elemento piezoeletrico próximo à ressonância, a frequência de ressonância é aquela em que o valor do módulo da impedância é mínimo e a frequência de anti-ressonância é aquela em que o valor do módulo da impedância é máximo; tanto para frequência de ressonância como para a frequência de anti-ressonância a fase da impedância é nula.

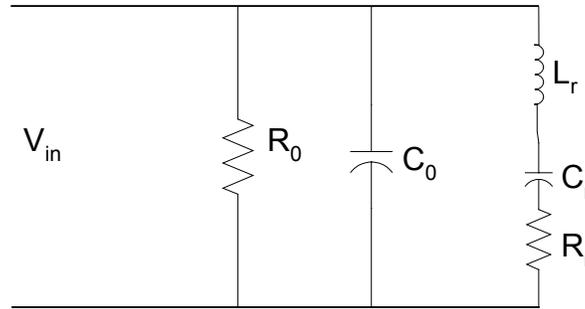


Figura II.3. Circuito equivalente de Mason simplificado, em que R_0 e C_0 representam as perdas e a capacitância intrínseca da cerâmica e L_r , C_r e R_r representam os efeitos inerciais, elásticos e de atrito, respectivamente, do elemento transdutor na ressonância, modificado de Church e Pincock (1985).

O fabricante do material cerâmico fornece as principais constantes de frequência, cada uma associada a um modo de ressonância, como a N_P , constante de frequência do modo radial (ou planar) e a N_T , constante do modo espessura. Para calcular a frequência (de ressonância) em que um disco de cerâmica irá vibrar nos modos de vibração radial e espessura, utilizam-se as equações:

$$\text{Para o modo radial: } N_P = f * D \quad (\text{Hz} * \text{m}); \quad (2.2)$$

$$\text{Para o modo espessura: } N_T = f * e \quad (\text{Hz} * \text{m}); \quad (2.3)$$

Onde: f = frequência;

D = diâmetro; e

e = espessura.

As Equações (2.2) e (2.3) são válidas para um disco; outras formas geométricas possuem outras equações que não são apresentadas aqui.

No transdutor piezelétrico usado na obtenção de imagens médicas, na caracterização de tecidos biológicos e ensaios não-destrutivos de materiais, o elemento ativo pode ser unitário ou múltiplo, geralmente de formato retangular ou circular.

O tamanho do transdutor utilizado está relacionado às dimensões do elemento ativo ou ao número de elementos ativos, e é determinado pela área a ser examinada. Diâmetros grandes do transdutor provêm uma varredura mecânica fácil e um foco ótimo para zonas focais distantes. Transdutores pequenos são mais adequados para investigações em áreas anatômicas de formas irregulares, pequenas superfícies de pele, e investigações que necessitam de uma resolução melhor com mínima penetração.

Para um transdutor de ultra-som em que o elemento ativo é um disco de cerâmica piezoelétrica, quanto mais alta a frequência de trabalho, menor deve ser a espessura do disco. Os transdutores que geram as frequências mais altas produzem comprimentos de onda mais curtos e permitem maior resolução. No entanto, a absorção das frequências mais altas, pelos tecidos do corpo, é maior, fazendo com que a penetração do campo acústico seja menor. A energia acústica é absorvida de maneira diferente pelos diversos tecidos biológicos, pois a absorção depende também da elasticidade e da densidade do meio de transmissão do ultra-som (Aero-tech Reports, 1978 e 1980a).

II.1.a.2 Camada de retaguarda – Esta camada é usada para dar suporte mecânico ao transdutor, para garantir máxima eficiência no acoplamento eletromecânico, e para impedir que haja reverberação.

A reverberação é causada pela diferença entre as impedâncias acústicas da cerâmica piezoelétrica e os meios que fazem contato com ela. A impedância acústica Z é definida como o produto da densidade ρ (g/cm^3) do material pela velocidade c (cm/s) do som no material:

$$Z = \rho c \quad (2.4)$$

Ao atravessar a interface entre dois meios de transmissão (meio 1 e meio 2) de impedâncias acústicas Z_1 e Z_2 diferentes, parte do campo acústico incidente (L) é transmitido (L_2) para o meio 2 através da interface e parte é refletida (L_1) de volta para o meio 1, como está indicado na Figura II.4. Quando o campo acústico incide normal à interface, a intensidade da onda refletida L_1 é dada e pela Equação (2.5), e o coeficiente de reflexão R mostra a relação entre a intensidade da onda refletida L_1 , pela onda incidente L .

$$L_1 = L - L_2 \quad (2.5)$$

$$R = \frac{L_1}{L} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (2.6)$$

E a relação entre a intensidade da onda que penetra no meio 2, L_2 com uma impedância Z_2 , pela intensidade da onda incidente L é dada pelo coeficiente de transmissão D , que é dado por:

$$D = \frac{L_2}{L} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.7)$$

As intensidades de campo refletida e transmitida dependem do ângulo de incidência do ultra-som na interface entre os meios e das impedâncias acústicas dos meios. Quanto maior a impedância do meio 2 em relação ao meio 1, maior a parcela de energia acústica refletida na interface. E também, quão mais próximo de 90° for o ângulo de incidência, menor a parcela de campo refletido e maior a parcela de energia acústica transmitida; porém, à medida que o ângulo α aumenta, aumenta a proporção das ondas transversas T_1 e

T_2 (Figura II.4), e diminuem as intensidades das ondas refletida e transmitida L_1 e L_2 , respectivamente (Köcis, 1996).

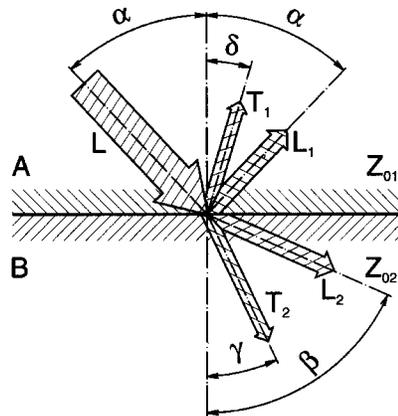


Figura II.4. Uma onda ultra-sônica L incide na interface entre os meios A e B com um ângulo de incidência α ; ao ser transmitida do meio A (impedância acústica Z_{01}) para o B (impedância acústica Z_{02}) uma parcela L_1 é refletida no meio A, com ângulo α igual ao de incidência e outra parcela L_2 é refratada no meio B com o ângulo β . T_1 e T_2 são ondas transversais (modificada de Köcis, 1996).

Quando um transdutor ultra-sônico é usado diretamente no corpo, menos de 20% da energia acústica incidente, aquela que chega na face posterior da cerâmica, é transferida para o meio de transmissão, e a maior parte dela é refletida de volta na cerâmica. Quando a onda acústica alcança a face anterior da cerâmica, novamente a energia acústica não é transferida para o meio anterior à cerâmica, e é transmitida em direção à face posterior. Assim, a cerâmica permanece vibrando até que a energia acústica seja totalmente dissipada. Quando um transdutor é usado em diagnóstico por ultra-som é desejável reduzir a parcela de energia acústica refletida na interface entre o transdutor e a superfície do corpo, para obter o melhor possível em sensibilidade e penetração do campo acústico.

A camada de anteparo deve ser construída com um material que possua impedância acústica semelhante à da cerâmica piezoelétrica para absorver totalmente a energia de vibração sem refleti-la de volta no interior da cerâmica. O formato da camada de anteparo

também influencia o quanto de energia acústica ela irá absorver Pereira, Glória e Machado (1996).

II.1.a.3 Camada de compatibilização acústica – Para aumentar a eficiência da transmissão de energia acústica do transdutor para o meio de transmissão, costuma-se incluir uma camada de um material com impedância acústica de valor intermediário entre as impedâncias da cerâmica e do meio de transmissão (por exemplo: tecido biológico), que é colocada na frente da cerâmica, para fazer a compatibilização das impedâncias, como está esquematizado na Figura II.5. A inclusão desta camada resulta em duas interfaces acústicas. As parcelas de energia acústica refletida e transmitida através dessa camada, são dependentes do ângulo de incidência do campo acústico, das impedâncias acústicas dos três materiais e da espessura da camada de compatibilização. A escolha apropriada do material e da espessura da camada pode resultar numa transmissão mais efetiva do campo acústico do meio 1 para o meio 2, através da camada de compatibilização. A camada de compatibilização permite que a energia acústica disponível no transdutor seja transmitida da face frontal da cerâmica para a carga, ou meio de transmissão, em vez de ser refletida e absorvida pela camada de anteparo, diminuindo perdas e possibilitando uma pressão acústica final maior Aero-tech Reports (1980a).

A camada de compatibilização acústica é geralmente implementada com espessura igual a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda ($\lambda/4$) da frequência de vibração do modo principal ou de um valor próximo a ela. Quando as duas ondas acústicas estão em fase, suas intensidades adicionam-se, e quando estão fora de fase, subtraem-se cancelando uma a outra. Como não é possível evitar a reflexão de parte da energia acústica incidente, procura-se com a técnica da camada de compatibilização de espessura $\lambda/4$, colocar as ondas refletidas em fase com

as ondas transmitidas através desta camada, de modo a reforçá-las Aero-tech Reports (1980a).

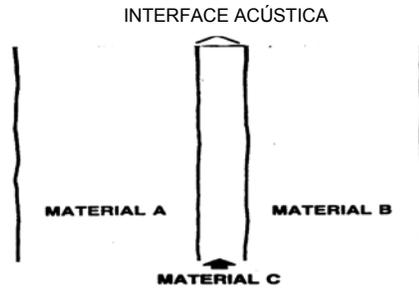


Figura II.5. Inserção de uma camada de compatibilização de material C entre os materiais A e B . Material A: transdutor de impedância Z_T . Material B: meio de transmissão de impedância Z_M . Material C: camada de compatibilização acústica de impedância Z_C . E: $Z_T > Z_C > Z_M$ (modificada de Aero-tech Reports, 1980a).

O material da camada de compatibilização com espessura $\lambda/4$ deve ser escolhido de modo a apresentar impedância acústica (Z_C) intermediária entre os valores de impedâncias do material do transdutor (Z_T) e do meio de transmissão do campo acústico (Z_M). O valor teórico ótimo de Z_C , para se obter o máximo de transmissão da energia acústica, pode ser calculado através da Equação 2.8 (Hunt, Arditi e Foster, 1983).

$$Z_C = \sqrt{Z_T * Z_M} \quad (2.8)$$

Usando o circuito equivalente de Mason para um transdutor sem camada de anteparo, a compatibilidade ótima (Hunt, Arditi e Foster, 1983) ocorre quando, ao usar uma única camada, esta tenha a impedância acústica igual a:

$$Z_C = \sqrt[3]{2 * Z_T * Z_M} \quad (2.9)$$

A solução da camada de compatibilização com espessura $\lambda/4$ resolve o problema de transferência de energia acústica para apenas uma frequência, a de ressonância do modo principal, e deixa a faixa de passagem do transdutor ainda mais estreita. No diagnóstico por

ultra-som através da técnica de pulso-eco são usados pulsos estreitos de faixa larga, que contém uma quantidade significativa de energia acústica fora da frequência principal, e o coeficiente de reflexão é razoavelmente grande para os comprimentos de onda diferentes do qual foi considerado para a escolha da camada de compatibilização. O coeficiente de reflexão é definido como a razão das amplitudes do som incidente e do som refletido Desilets, Fraser e Kino (1978).

Para melhorar o desempenho do transdutor, a idéia da camada de compatibilização pode ser expandida, incorporando uma segunda camada, onde a primeira camada tem espessura d_{11} e impedância acústica Z_{C1} e a segunda camada tem espessura d_{12} e impedância acústica Z_{C2} .

A transição da impedância acústica da cerâmica para a do tecido biológico em dois passos, resulta numa reflexão menor, melhor transmissão e aumento da faixa de passagem do transdutor. A espessura de cada uma das camadas de compatibilização pode ser, mas não é limitada a $\lambda/4$. O valor da impedância de cada camada pode ser calculado através da simulação do modelo em computador. A utilização de duas ou mais camadas de compatibilização acústicas reduz a reverberação em cada uma das camadas, resultando num pulso acústico transmitido mais estreito e com faixa de passagem mais larga, porém quanto maior o número de camadas maior será a atenuação do sinal.

Um transdutor perfeitamente casado com o meio de transmissão é aquele que está operando com uma camada de anteparo com impedância acústica igual à do elemento transdutor, a qual dissipa toda a energia acústica que recebe, e camada de compatibilização que transmite toda a energia acústica para o meio de transmissão, sem reflexão Desilets, Fraser e Kino (1978); Aero-tech Repors (1978).

II.1.a.4 Compatibilização elétrica – É usada para compatibilizar as impedâncias elétricas do transdutor e do instrumento elétrico que funciona como gerador de pulso/receptor. Varia desde um simples indutor a circuitos RLC e transformadores. Quando a diferença de impedâncias entre o gerador de pulsos/receptor e o transdutor não é equilibrada, ocorre o *electrical ringing*, quando uma parte do pulso de excitação elétrica da cerâmica é refletida de volta para o gerador. A compatibilização elétrica melhora a faixa de passagem e a sensibilidade do transdutor, pois permite uma excitação mais eficiente do elemento piezoelétrico.

Na Figura II.3 foi apresentado o modelo simplificado que representa um transdutor piezoelétrico vibrando no modo espessura. Este modelo é derivado do circuito equivalente de Mason, e nele distinguem-se duas partes: uma elétrica, representada por R_0 e C_0 e uma mecânica, representada por L_r , C_r e R_r . Mesmo sendo bastante simples este modelo representa bem a cerâmica piezoelétrica para valores de frequência próximos à ressonância, onde os parâmetros envolvidos são:

f_r = frequência de ressonância série, na qual atinge um valor mínimo R_r ;

f_{ar} = frequência paralela ou de anti-ressonância, na qual a impedância atinge um valor máximo;

R_r = valor de impedância na frequência de ressonância, representa os efeitos de atrito na cerâmica;

C_r = capacitância série na ressonância, representa os efeitos da elasticidade na cerâmica;

L_r = indutância série na ressonância, representa os efeitos inerciais da cerâmica;

C_0 = capacitância elétrica ou intrínseca da cerâmica; e

R_0 = representa as perdas elétricas na cerâmica.

Para o modelo de Mason simplificado, temos as seguintes equações:

$$C_r = C_0 \frac{f_{ar}^2 - f_r^2}{f_r^2} \quad (2.10)$$

$$C_0 = C' - C_r \quad (2.11)$$

$$L_r = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_r} \quad (2.12)$$

Onde: C' é a capacitância da cerâmica numa frequência bem abaixo da ressonância f_r .

Das Equações 2.10 a 2.12 nota-se que a capacitância da cerâmica na ressonância está relacionada ao valor da capacitância intrínseca, através do coeficiente de acoplamento eletromecânico. O valor da indutância L_r e da capacitância C_r são tais que as componentes reativas da impedância da cerâmica na ressonância anulam-se, resultando apenas a componente resistiva.

Uma solução bastante simples para realizar a compatibilização elétrica de maneira passiva é a utilização de um indutor em paralelo com o transdutor. O valor da indutância L_0 deve ser escolhido de maneira a anular a componente reativa da impedância elétrica do transdutor na frequência de ressonância f_r . Pela Equação 2.13 temos :

$$Z = R_0 + j(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0}) \quad (2.13)$$

Onde: Z = a impedância elétrica do transdutor; e

L_0 = é a indutância paralela para compatibilização elétrica.

Na compatibilização elétrica em paralelo, a indutância L_0 entra em ressonância com a capacitância C_0 na frequência de ressonância f_r , de acordo com a equação:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \quad (2.14)$$

A faixa de passagem (*FWB*) ou de -3dB , de um transdutor sem sintonização, é dada pela Equação 2.15:

$$FWB \cong \frac{C_r}{2C_0} \quad (2.15)$$

E a faixa de passagem de um transdutor sem sintonização mas com indutor em paralelo, é dada por:

$$FWB = \sqrt{\frac{C_r}{C_0}} \quad (2.16)$$

O transdutor com indutor em paralelo tem em geral uma faixa de passagem maior para uma mesma impedância da camada de anteparo em relação ao transdutor sem casamento elétrico, e também o valor da impedância próximo à ressonância aumenta, o que possibilita um melhor acoplamento com a impedância típica de um transmissor. Além do uso de um indutor em paralelo, pode-se também usar um indutor em série, ou um transformador sintonizado, para realizar a compatibilização elétrica do transdutor Desilets, Fraser e Kino (1978).

II.1.a.5 Revestimento – O revestimento deve ser eletricamente isolado e acusticamente desacoplado do elemento ativo, para evitar interferência elétrica ou ressonância acústica. Devem ser escolhidos materiais com densidade e velocidade acústica próximas às da água, para não interferir na camada de compatibilização acústica na face frontal da cerâmica Aero-tech Reports (1978).

II.1.a.6 Focalização – A focalização do campo acústico gerado por um transdutor de elemento ativo único e plano, é feita através da colocação de lentes plásticas na frente do

transdutor. A focalização ocorre no ponto do campo acústico no qual todas as contribuições da superfície do transdutor chegam juntas. A curvatura da lente deve ser escolhida de acordo com a profundidade do foco desejada. Essas lentes em geral são modeladas para produzir um ponto focal localizado ao longo do eixo central da curvatura da lente Aero-tech Reports (1978).

II.1.b Circuitos Equivalentes

O conhecimento do circuito elétrico equivalente do transdutor proporciona uma escolha apropriada do amplificador de potência e permite uma predição do desempenho do transdutor, e também pode ser usado para solucionar problemas elétricos e mecânicos do transdutor.

Na figura II.3 foi mostrado o circuito equivalente simplificado de um transdutor de ultra-som operando numa frequência próxima à de ressonância do modo principal, desenvolvido por Mason.

Existem outros modelos equivalentes que descrevem o funcionamento do transdutor, como o modelo equivalente de Krimholtz, Leedom e Matthaei (modelo KLM), que representa o transdutor como linha de transmissão acústica natural Desilets, Fraser e Kino (1978).

II.2. Características de um Transdutor Ultra-sônico

II.2.a. Fator Q de um Transdutor Ultra-sônico

Entre as características mais importantes de um transdutor piezoelétrico estão os fatores de acoplamento eletromecânico e o Q mecânico. Os transdutores piezoelétricos com aplicação em diagnóstico médico, normalmente são projetados para vibrar

preferencialmente no modo espessura, mas uma parte da energia elétrica de excitação também é acoplada a outros modos secundários.

A maneira como a cerâmica vibra depende de como o transdutor está montado. O tipo de montagem do transdutor determinará a presença e a extensão dos modos secundários. Transdutores com camada de anteparo feita de ar reverberam muito e são os que apresentam maior número de modos de vibração.

Se um transdutor piezoelétrico for excitado por um único pulso de tensão, a vibração mecânica observada decairá até anular-se. A cada ciclo de vibração – compressão e expansão – do elemento transdutor, uma parte da energia da cerâmica é transformada em calor. Quanto maior a quantidade de energia perdida por ciclo, mais rapidamente a vibração será amortecida. Esta característica do transdutor é descrita pelo Q do transdutor, que é a relação entre a energia armazenada e a energia despendida por ciclo de vibração.

Um Q baixo indica muita energia gasta a cada ciclo de vibração, e o transdutor vibra pouco tempo. Um transdutor com Q alto perde pouca energia por ciclo e vibra durante um bom tempo. O material de Q alto vibra numa faixa estreita de frequências, e os transdutores montados com este tipo de material são eficientes como transmissores, enquanto o material de Q baixo vibra numa faixa mais larga, característica que o define como bom receptor.

A duração ou comprimento do pulso acústico gerado por um transdutor é determinado pelo Q do transdutor, que pode ser calculado pela Equação 2.17:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (2.17)$$

Onde: f_0 = frequência de ressonância natural da cerâmica;

Δf = largura da faixa de passagem ou de -3 dB da cerâmica, que representa o intervalo de frequências no qual a sensibilidade do transdutor é máxima, ou até 3dB menor que este valor máximo.

O que define a escolha de um transdutor piezoelétrico, que deve funcionar tanto como transmissor como receptor, é a faixa de passagem na qual ele trabalha. Normalmente escolhe-se um elemento piezoelétrico de material de sensibilidade alta e que seja bom transmissor na faixa de frequências em que deve operar; como um material de alta sensibilidade também apresenta alta impedância acústica em relação à água, é necessário utilizar um bom esquema de compatibilização de impedâncias, para conseguir máxima transferência de energia acústica entre o transdutor e a água Aero-tech Reports (1978).

Perto de cada frequência de ressonância, o transdutor terá uma resposta à tensão que irá variar de acordo com a proximidade desta frequência com a frequência de ressonância.

A magnitude de Q é determinada pelas perdas (absorção e transmissão) encontradas no transdutor. O que mais contribui para as perdas da maioria dos transdutores é a transmissão de potência acústica através das interfaces nas regiões vizinhas ao elemento piezoelétrico, sendo que as perdas internas em bons materiais são pequenas. Se as regiões vizinhas em ambos os lados do elemento transdutor é formada de ar, a diferença de impedâncias acústicas em ambas as interfaces é grande, ocorre reverberação do pulso acústico, o elemento piezoelétrico vibra por um bom tempo, gerando um pulso acústico longo, e o Q resultante é elevado Christensen (1988); Aero-tech Reports (1978).

II.2.b. Resolução Axial

A resolução axial de um transdutor é a resolução espacial do mesmo na direção de propagação do feixe acústico. A resolução axial pode ser definida como a capacidade do transdutor de distinguir duas superfícies refletoras muito próximas que estejam em planos perpendiculares ao eixo do transdutor, isto é, paralelos à face do transdutor. Quando a distância entre as duas superfícies refletoras é igual ou maior que a resolução axial do transdutor, elas podem ser resolvidas como refletores separados. Se elas estão mais próximas que a resolução espacial, seus ecos são fundidos num só pelo transdutor.

A necessidade de um Q alto ou baixo depende de como o transdutor está operando: no modo contínuo ou pulsátil. Se estiver operando no modo pulsátil, um transdutor com baixo Q é desejável, devido à resolução axial (RA) do instrumento ser dependente do comprimento da forma de onda pulsada. A profundidade de uma superfície refletora é medida pelo tempo de trânsito do pulso refletido na interface: um pulso de curta duração transmitido fornecerá uma medida mais precisa do tempo de chegada do eco. Definindo o tempo efetivo de duração do pulso como sendo t' e usando a relação “distância é igual velocidade vezes tempo”, temos:

$$RA = \frac{t' c}{2} \quad (2.18)$$

O fator 2 entra devido à reflexão da onda, ou seja o pulso ultra-sônico percorre duas vezes a distância até retornar ao transdutor.

Relacionando o tempo efetivo com Q e com o comprimento de onda (λ), temos a seguinte equação:

$$RA \approx \frac{Q\lambda}{4} \quad (2.19)$$

A Equação (2.18) revela a importante relação entre a resolução e o comprimento de onda. Quanto menor o comprimento de onda, melhor será a habilidade de resolver detalhes sendo que um pequeno valor de resolução axial leva a um aumento na medida de ecos. Para uma boa resolução, o instrumento ultra-sônico deve empregar frequências altas, limitadas somente pelo aumento da atenuação Christensen (1988).

Duas características do transdutor influenciam a sua resolução axial: a) amortecimento: as vibrações da cerâmica devem ser amortecidas rapidamente, para que o transdutor seja capaz de receber os ecos das várias superfícies refletoras; e b) frequência: quanto maior a frequência de operação de um transdutor, menor seu comprimento de onda, e melhor sua capacidade de resolução axial. A expressão matemática para o comprimento de onda é:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.20)$$

Onde: c = a velocidade de propagação do som no meio; e

f = a frequência de vibração

II.2.c. Resolução Lateral

A resolução lateral pode ser definida como a capacidade do transdutor de distinguir duas superfícies refletoras bem próximas e paralelas ao eixo do campo acústico. A forma de onda dos ecos recebidos, quando o transdutor realiza uma varredura transversal à sua face, depende do espaçamento lateral dos alvos refletores. Quando a separação entre os alvos é maior que a largura do feixe acústico, os ecos de cada alvo são distingüidos. Se eles estão separados por uma distância menor que a largura do feixe, os ecos começam se misturam, e os alvos não podem ser resolvidos separadamente: eles aparecem como um único objeto refletido.

O espaçamento no plano transversal para que cada alvo refletor seja resolvido separadamente é conhecido como resolução lateral (LR), e uma medida razoável de LR é o diâmetro do ponto focal d do transdutor Aero-tech Reports (1979a), calculado pela Equação 2.21:

$$LR \approx d \quad (2.21)$$

A motivação para focalização do feixe acústico emitido pelo transdutor de ultra-som é reduzir o tamanho do ponto focal d no sistema de imagem.

Para um transdutor circular, com diâmetro D , e comprimento focal l_f , a resolução lateral é calculada Aero-tech Reports (1979a), pela Equação 2.22:

$$LR \approx \frac{2,44l_f\lambda}{D} \quad (2.22)$$

A resolução do transdutor em todas as direções (lateral e axial) está intimamente relacionada ao comprimento de onda λ , e, de modo prático, não pode ser menor que o comprimento de onda na frequência de operação do transdutor. Transdutores com alta resolução empregam frequências tão altas quanto possíveis, até que um aumento da atenuação leve a intensidade dos ecos recebidos a limites muito baixos de razão sinal-ruído.

II.2.d. Focalização de lentes

A largura do feixe de um transdutor não-focalizado é geralmente muito larga para uma definição adequada das características laterais dos objetos investigados. Uma lente ou outro esquema de focalização como um refletor esférico é usualmente empregado para

fazer convergir o feixe radiado a partir do transdutor em um ponto no plano focal da lente Desilets, Fraser e Kino (1978).

II.2.e. Sensibilidade do transdutor ultra-sônico

A sensibilidade do transdutor está relacionada à sua habilidade de detectar alvos pequenos localizados a profundidades conhecidas num meio atenuante. A sensibilidade de um transdutor é um dos parâmetros mais difíceis de se definir, e é influenciada pelo tipo de material piezelétrico usado, pelo pulso de excitação do transdutor, pela resposta em frequências do transdutor, pela eficiência na conversão de energia, pelas camadas de anteparo e de compatibilização elétrica e pela geometria e características de focalização do campo acústico. Existem também variáveis que não dependem do transdutor, como a atenuação do meio de transmissão e os tipos de materiais refletores.

A multiplicação da eficiência da transmissão pela eficiência da recepção de um transdutor operando em pulso-eco, é uma definição bastante simples de sensibilidade de um transdutor. A eficiência é definida, na transmissão, como a razão entre a energia do pulso de excitação e a energia convertida em pulso acústico, através do efeito piezoelétrico. O pulso acústico é transmitido a partir do transdutor através de um meio e o eco é refletido de volta por uma interface deste meio; a razão entre a energia do pulso acústico refletido e a energia elétrica convertida pelo efeito piezoelétrico reverso, é a eficiência de um transdutor receptor. A sensibilidade típica de um transdutor pulso-eco de aplicação clínica é menor que 5% Church e Pincock (1985), Para o transdutor de ultra-som usado em Doppler a sensibilidade fica em torno de 5% para frequência maior ou igual a 2.5MHz Teirlinck, Bezemer, Kollmann, Lubbers, Hoskins, Fish, Fredfeldt e Schaarschmidt (1998).

II.2.f. Padrão do Campo Acústico

O padrão de radiação do campo acústico produzido pelo transdutor é importante na determinação da sensibilidade espacial do equipamento de imagem por ultra-som, tanto no modo de transmissão como recepção.

O campo acústico gerado por um transdutor piezoelétrico (considera-se o disco de cerâmica como um pistão circular plano, rígido, vibrando em movimento harmônico simples) pode ser dividido em duas regiões: campo próximo ou região de Fresnel, e o campo distante ou região de Fraunhofer, como está indicado na Figura II.6 Zemanek (1970); Kinsler et alii (1982). Este padrão de campo pode ser explicado como uma combinação de duas componentes: ondas planas e ondas de borda Tupholme (1969); Brittain e Weigh (1986).

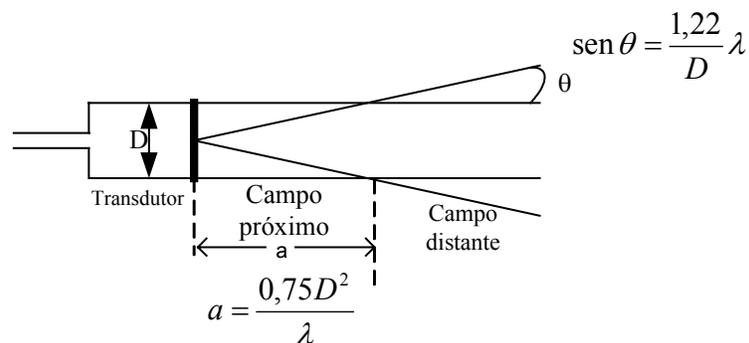


Figura II.6. Formato simplificado do campo ultra-sônico de um transdutor piezoelétrico ideal em que o elemento ativo é um disco de cerâmica piezoelétrica. D é o diâmetro do transdutor, λ é o comprimento de onda do campo e θ é o ângulo de divergência do campo (modificada de Zemanek, 1970).

As ondas planas propagam-se a partir de toda a face do transdutor, na região geométrica do campo acústico. As ondas de borda irradiam a partir do perímetro da fonte e espalham-se em todas as direções. A borda do pistão está presa ao plano rígido infinito, e as

ondas ultra-sônicas ali geradas, podem interferir com as ondas planas, geradas no centro da superfície do pistão.

Excitando-se um disco de cerâmica piezoelétrica com pulsos de tensão elétrica, de duração curta, e medindo-se o campo ultra-sônico com um transdutor pontual (de PVDF ou de cerâmica piezoelétrica), pode-se observar as componentes direta (onda plana) e de borda.

A distâncias axiais pequenas, as ondas planas e de borda podem ser distinguidas no domínio do tempo: a onda de borda aparece como um réplica invertida da onda plana. Com o aumento da distância axial, a separação no tempo das componentes diminui, até que estas eventualmente se sobrepõem.

É a sobreposição das ondas de borda e plana que determina o comportamento do campo acústico nas zona de Fresnel (ou campo próximo) e na zona de Fraunhofer. Na zona de Fresnel ou campo próximo a interferência é bastante notada: há sobreposição construtiva (máximos e mínimos) ou destrutiva (zeros), causando os efeitos de difração acústica. Na Figura II.7 é apresentada uma representação da região de Fresnel do campo acústico.

Na região do campo distante, a interferência é total; as diferenças mínimas de fase entre as ondas plana e de borda não são tão notadas como na região próxima, e a interferência não é destrutiva, formando uma frente de onda quase plana. O campo ultra-sônico na região distante é divergente.

Assim, o campo acústico muda continuamente de forma com o aumento da distância axial, devido à constante variação da separação no tempo entre as componentes das ondas plana e de borda

Fora do eixo, mas dentro da região geométrica do pistão, o campo ultra-sônico também é composto pela superposição das componentes plana e de borda. Mas as contribuições das ondas de borda não chegam ao ponto fora do eixo em fase, como uma única onda: chegam como 2 ondas, uma resultado das fontes da borda mais próxima, e outra, da borda mais distante. Deslocando-se para a direção do eixo, estas 2 ondas são observadas, no ponto fora do eixo, como duas réplicas invertidas da onda plana. Fora da região geométrica do pistão não existe onda plana; existe uma onda distorcida formada pela contribuição das fontes da borda mais próxima e outra onda distorcida formada pelas fontes da borda mais distante, invertida em relação à primeira Weight e Hayman (1978).

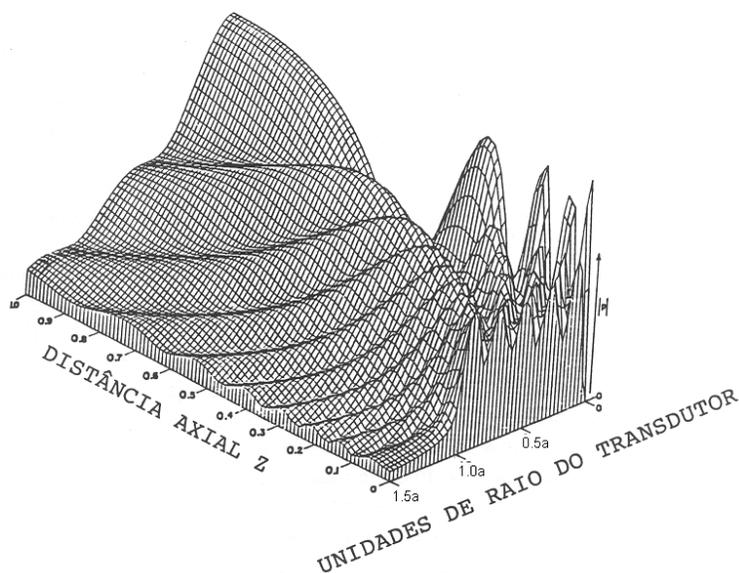


Figura II.7. Pressão acústica no campo próximo. a = raio do pistão; λ = comprimento de onda, $a/\lambda = 5$ (modificada de Zemanek, 1970).

Para melhor divisão dos capítulos os conceitos complementares sobre parâmetros para caracterização dos transdutores segundo as normas vigentes e sobre campo acústico, foram abordados na metodologia juntamente com a descrição das medidas realizadas.

Capítulo III – Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os procedimentos para a construção e caracterização de um transdutor de ultra-som construído com cerâmica piezoelétrica. As etapas de construção de um transdutor incluem: a determinação das frequências de ressonância e de anti-ressonância e o coeficiente de acoplamento eletromecânico dos principais modos de vibração (radial e espessura) das cerâmicas, o estabelecimento de contato elétrico com os eletrodos da cerâmica, construção das camadas de retaguarda e de acoplamento acústico, a compatibilização elétrica, e o acabamento final com colocação do revestimento externo, do cabo coaxial e do conector BNC. Para fazer a caracterização dos transdutores de ultra-som foram analisados os seguintes parâmetros: medida da largura de faixa de passagem, cálculo do *ringdown*, mapeamento da área ativa, mapeamento do perfil transversal, mapeamento do perfil axial, e medida do espalhamento do campo.

Também serão apresentadas as variações utilizadas na constituição das camadas de retaguarda e acoplamento acústico para os transdutores construídos.

Os transdutores foram construídos e caracterizados no Laboratório de Ultra-Som (LUS) do Departamento de Engenharia Biomédica (DEB) da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da UNICAMP. Este laboratório se encontra no Centro de Engenharia Biomédica (CEB/UNICAMP).

III.1. Construção de Transdutores

III.1.a. Documentação dos modos de vibração das cerâmicas

Os discos cerâmicos usados para a construção dos transdutores de ultra-som, são de cerâmicas piezoelétricas de titanato zirconato de chumbo, elaboradas no Laboratório de Cerâmicas Piezoelétricas do Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos. O material destas cerâmicas é equivalente ao PZT-5A. Disponha-se inicialmente de 19 discos cerâmicos, numerados de #1 a #19, todos com diâmetro igual a 12mm e espessura de 1mm, e frequência nominal de 2MHz.

A primeira etapa na construção dos transdutores é a documentação das cerâmicas piezoelétricas, que consiste na obtenção das curvas de módulo da impedância *versus* frequência e fase da impedância *versus* frequência. Foi utilizado o analisador de impedância da HP, modelo 4192A LF Impedance Analyzer, 5kHz – 13MHz. Foram adquiridos os dados para traçar as curvas com as cerâmicas vibrando livremente nas faixas de frequência de 25kHz a 1025kHz e de 1MHz a 2,5MHz. As curvas foram traçadas no *plotter* 7090A Measurement Plotting System da HP, diretamente conectado ao analisador de impedância. Estes dois intervalos de frequência contêm os modos principais de vibração da cerâmica, no primeiro intervalo, de 25kHz a 1025kHz, tem-se o modo radial de vibração da cerâmica, e no segundo intervalo, de 1MHz a 2,5MHz, encontra-se o modo espessura de vibração.

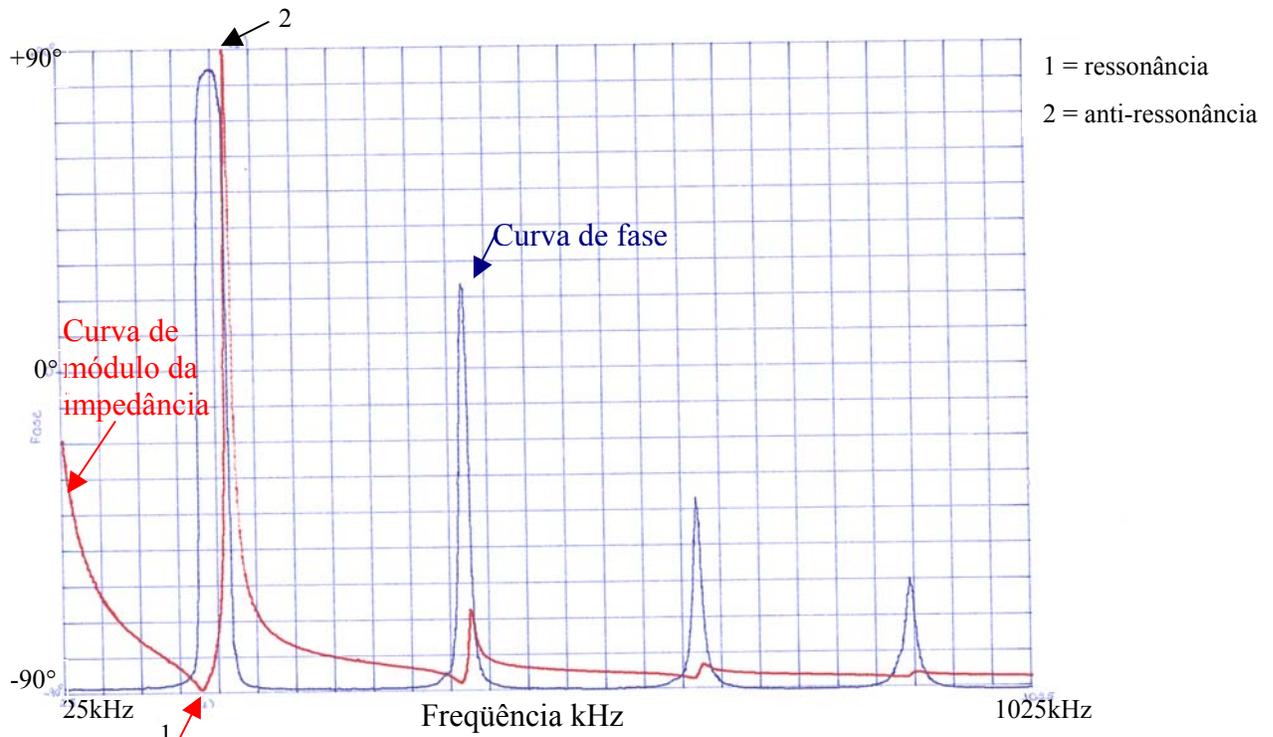
Através destas curvas pôde-se identificar a frequência de ressonância (f_r), frequência na qual o módulo de impedância é mínimo, e a frequência de anti-ressonância (f_{ar}), frequência na qual o módulo de impedância é máximo, de cada modo de vibração da cerâmica. Nestes valores de frequência, a curva de fase idealmente cruza pelo valor 0° . Na

Figura III.1 são mostradas as curvas de módulo da impedância *versus* frequência e fase da impedância *versus* frequência, obtidas com a cerâmica #19, onde estão indicados os modos de vibração radial e espessura.

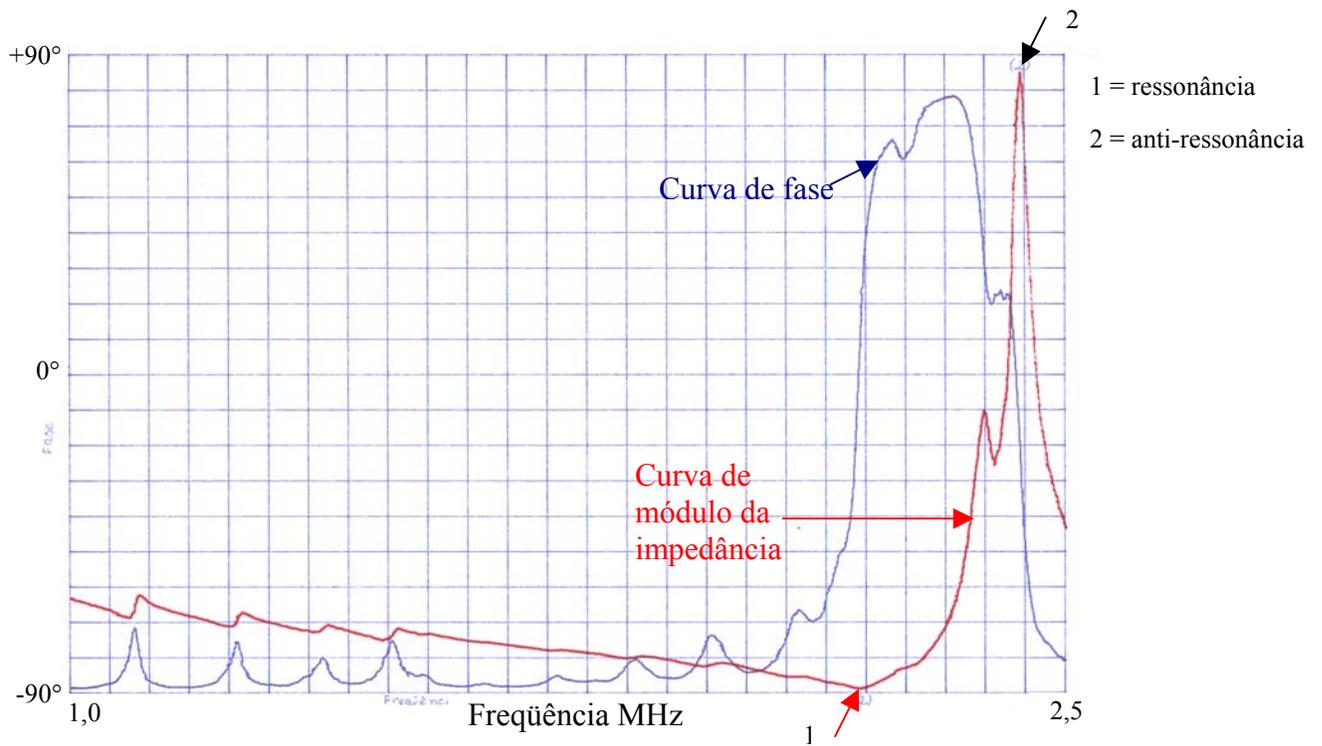
Com os dados das frequências de ressonância e anti-ressonância, calcula-se o coeficiente de acoplamento eletromecânico dos principais modos de vibração de cada cerâmica, pela Equação 2.1, como foi apresentado no Capítulo II. Como pode ser observado na Figura III.1 existem outros modos de vibração quando a cerâmica está vibrando livremente, porém estes modos de vibração são fracamente acoplados e, portanto, serão eliminados pela estrutura de construção dos transdutores.

III.1.b. Contato elétrico com o eletrodo da face negativa do disco cerâmico

Após a documentação dos modos de vibração da cerâmica remove-se a sujeira depositada nos eletrodos metálicos, e solda-se um fio no eletrodo negativo da cerâmica, para estabelecer contato elétrico com o circuito de excitação da cerâmica do transdutor de ultra-som. A soldagem do fio é feita de forma que o fio fique perpendicular à face da cerâmica, como mostrado na Figura III.2, seguindo recomendações de Ferroperm Product Support (1990), para minimizar o risco de quebrar o fio durante a montagem do transdutor. Também teve-se com o cuidado de não utilizar temperaturas acima de 200°C para não aquecer em excesso a cerâmica e despolarizá-la no local da soldagem. Foi usada uma estação de solda com temperatura controlada e ponteira fina (diâmetro 0,9mm).



(a)



(b)

Figura III.1. Curvas de módulo (vermelho) e fase (azul) da impedância : (a) para o modo radial; e (b) o modo espessura de vibração da cerâmica #19.



Figura III.2. Fio soldado perpendicularmente à face da cerâmica.

III.1.c. Camada de retaguarda

Para moldar a camada de retaguarda do transdutor utilizou-se um tubo de PVC com diâmetro interno 0,5mm maior que o diâmetro da cerâmica. A cerâmica foi encaixada nesse tubo com a face positiva coincidindo com uma das extremidades do tubo, e o fio soldado no eletrodo da face negativa, saindo pela outra extremidade.

A camada de retaguarda do transdutor é constituída por uma mistura de epóxi de baixa viscosidade e pó de alumina e/ou pó de tungstênio. Foram construídos transdutores com três tipos de camada de retaguarda: mistura de epóxi e pó de alumina; epóxi com pó de tungstênio; e epóxi com pó de alumina e pó de tungstênio. A mistura é colocada dentro do tubo de PVC, preenchendo aproximadamente 2/3 do seu volume, cuidadosamente para compactá-la contra a face negativa da cerâmica sem formar bolhas de ar. Para retirar eventuais bolhas, o tubo de PVC é colocado num suporte, para evitar que a cerâmica não se solte do mesmo, e é centrifugado por 2 a 3 minutos. É necessário um período de 24 horas para secar a mistura da camada de retaguarda.

Os transdutores construídos foram numerados de acordo com a numeração das cerâmicas. Por exemplo: no transdutor #6 foi utilizada a cerâmica #6.

III.1.c.1. Camada de retaguarda composta de epóxi e pó de alumina

Para os transdutores #16, #17, #18 e #19 foi preparada uma camada de retaguarda composta de epóxi e alumina com as seguintes proporções: 19,81g de epóxi, 6,93g de endurecedor e 17,81g de alumina em pó, com uma massa total de 44,55g, sendo a proporção de alumina resultante igual a 39,98%.

No transdutor #6 foi utilizada uma camada de retaguarda composta de epóxi e alumina. A composição desta camada foi a seguinte (em massa): 5,13g de epóxi, 2,76g de endurecedor e 4,63g de alumina. A massa total foi 12,52g, sendo a porcentagem de alumina resultante igual a 36,98% (esta camada foi preparada posteriormente à mistura das camadas de retaguarda dos transdutores #16 a #19 e obteve-se uma proporção de alumina 3% menor).

A densidade da camada de retaguarda foi calculada para cada transdutor, respeitando a proporção estequiométrica de epóxi e pó de alumina com seus respectivos valores de densidade, de acordo com a Equação 3.1 Hunt, Arditi e Foster (1983). Os valores calculados das densidades das camadas de retaguarda utilizadas na montagem dos transdutores são apresentados na Tabela III.1.

$$\rho = 1,23.m'_e + 2,65.m'_{al} \quad (3.1)$$

Onde: m'_e é a porcentagem da massa de epóxi;

m'_{al} é a porcentagem da massa de pó de alumina;

1,23 é a densidade do epóxi em $\text{kg/m}^3 \times 10^3$; e

2,65 é a densidade da alumina em $\text{kg/m}^3 \times 10^3$.

Tabela III.1. Valores da densidade da camada de retaguarda composta de epóxi e pó de alumina dos transdutores #6 3 #16 a #19.

Transdutor	ρ (g/cm ³)
#6	1,75
#16	1,80
#17	1,80
#18	1,80
#19	1,80

III.1.c.2. Camada de retaguarda composta de epóxi e pó de tungstênio

Nos transdutores #5, #8, #10 e #13 foi utilizada camada de retaguarda composta de epóxi e tungstênio.

A composição da camada de retaguarda (em massa) para os transdutores #10 e #13 foi a seguinte: 19,2g de epóxi, 6,72g de endurecedor e 6,7g de tungstênio. A massa total foi 32,62g, sendo a porcentagem resultante de tungstênio igual a 20,5%.

A composição da camada de retaguarda (em massa) para o transdutor #5 foi a seguinte: 9,22g de epóxi = 3,22g de endurecedor e 3,11g de tungstênio. A massa total foi 15,55, sendo a proporção resultante de tungstênio igual a 20,0%.

A composição da camada de retaguarda (em massa) do transdutor #8 foi a seguinte: 5,40g de epóxi, 2,90g de endurecedor e 3,03g de tungstênio. A massa total foi 11,33g, sendo a proporção resultante de tungstênio igual a 26,74%.

As proporções finais de tungstênio são diferentes nos transdutores deste grupo, pelo fato das misturas terem sido preparadas separadamente.

A densidade da camada de retaguarda foi calculada para cada transdutor, respeitando a proporção estequiométrica de epóxi e pó de tungstênio com seus respectivos valores de densidade, de acordo com a Equação 3.2 Hunt, Arditi e Foster (1983). Os

valores calculados das densidades das camadas de retaguarda utilizadas na montagem dos transdutores são apresentados na Tabela III.2.

$$\rho = 1,23.m'_e + 18,7.m'_w \quad (3.2)$$

Onde: m'_e é a porcentagem da massa de epóxi;

m'_w é a porcentagem da massa de pó de tungstênio (W);

1,23 é a densidade do epóxi em $\text{kg/m}^3 \times 10^3$; e

18,7 é a densidade do tungstênio em $\text{kg/m}^3 \times 10^3$.

Tabela III.2. Valores da densidade das camadas de retaguarda compostas de epóxi e pó de tungstênio dos transdutores #5, #8, #10 e #13.

Transdutor	ρ (g/cm^3)
#5	5,06
#8	5,86
#10	5,70
#13	5,70

III.1.c.3. Camada de retaguarda composta de epóxi, pó de alumina e pó de tungstênio

Nos transdutores #4, #14 e #15, foi utilizada uma camada de retaguarda composta de epóxi, alumina e tungstênio. A composição desta camada foi a seguinte (em massa): 43,88g de epóxi, 15,36g de endurecedor, 14,93g de pó de W (tungstênio) e 14,90g de pó de alumina. A massa total foi 89,07g, sendo a porcentagem de tungstênio igual a 16,76% e a de alumina igual a 16,61%.

No transdutor #2 também foi usada uma camada de retaguarda composta de epóxi, alumina e tungstênio, e sua composição foi a seguinte (em massa): 5,82g de epóxi, 3,13g de endurecedor, 2,32g de pó de W (tungstênio) e 2,31g de pó de alumina. A massa total foi

13,58g, sendo as porcentagens resultantes de tungstênio e de alumina iguais a 17,08% e 17,01%, respectivamente.

A densidade da camada de retaguarda foi calculada para cada transdutor respeitando a proporção estequiométrica de epóxi, de pó de alumina e de pó de tungstênio, com seus respectivos valores de densidade, de acordo com a Equação 3.3 Hunt, Arditi e Foster (1983). Os valores calculados das densidades das camadas de retaguarda utilizadas na montagem dos transdutores são apresentados na Tabela III.3.

$$\rho = 1,23.m'_e + 2,65.m'_{al} + 18,7.m'_w \quad (3.3)$$

Onde: m'_e é a porcentagem da massa de epóxi;

m'_{al} é a porcentagem da massa de pó de alumina;

m'_w é a porcentagem da massa de pó de tungstênio;

1,23 é a densidade do epóxi em $\text{kg/m}^3 \times 10^3$;

2,65 é a densidade da alumina em $\text{kg/m}^3 \times 10^3$; e

18,7 é a densidade do tungstênio em $\text{kg/m}^3 \times 10^3$.

Tabela III.3. Valores de densidade das camadas de retaguarda compostas de epóxi, pó de alumina e pó de tungstênio para os transdutores #2, #4, #14 e #15.

Transdutor	ρ (g/cm ³)
#2	4,69
#4	4,63
#14	4,63
#15	4,63

III.1.c.4. Impedância acústica da camada de retaguarda

Através da densidade do material pode-se calcular sua impedância acústica característica pela Equação 3.4:

$$Z_0 = \rho c \quad (3.4)$$

Onde: Z_0 = impedância característica do material;

ρ = densidade do material;

c = velocidade de propagação do som no modo espessura.

Na Tabela III.4. são mostrados o valor da impedância acústica do PZT5-A e os valores calculados de impedância acústica (Z_0) da camada de retaguarda de cada um dos transdutores construídos. As velocidades de propagação do som nas diferentes misturas são: 2602m/s na mistura de tungstênio e epóxi, 3100m/s na mistura de alumina e epóxi, e 2850m/s na mistura de epóxi, alumina e tungstênio Hunt, Arditi e Foster (1983).

Tabela III.4. Impedância acústica do PZT-5A e os valores calculados de Z_0 para as camadas de retaguarda dos transdutores

		Z_0 (kg/m ² s)
PZT-5A		33,7E+06
Epóxi e alumina		
Transdutor	#6	5,55E+06
Transdutor	#16	5,58E+06
Transdutor	#17	5,58E+06
Transdutor	#18	5,58E+06
Transdutor	#19	5,58E+06
Epóxi e tungstênio		
Transdutor	#5	14,5E+06
Transdutor	#8	16,8E+06
Transdutor	#10	16,3E+06
Transdutor	#13	16,3E+06
Epóxi e alumina e tungstênio		
Transdutor	#2	14,4E+06
Transdutor	#4	14,2E+06
Transdutor	#14	14,2E+06
Transdutor	#15	14,2E+06

III.1.d. Aterramento da cerâmica (contato elétrico com o eletrodo da face positiva da cerâmica)

O passo seguinte na construção dos transdutores de ultra-som foi o estabelecimento de contato elétrico com o eletrodo da face positiva da cerâmica piezoelétrica, que é a face voltada para o meio de transmissão do ultra-som, e que é aterrada. Para isto foi usado um tubo de latão colocado sobre o tubo de PVC que servia de molde para a camada de retaguarda. O contato elétrico deste tubo metálico com o eletrodo da face positiva da cerâmica foi feito inicialmente através de cola condutiva da Chemtronics modelo Circuit Works Conductive Epoxy. Como se verificou que a cola ressecava, após algum tempo, e perdia suas propriedades condutivas, este método foi substituído pela deposição de prata por *sputtering* na superfície do conjunto cerâmica, tubo de PVC, tubo de latão, formando uma camada única de eletrodo e contato com o tubo de latão, que é conectado à malha de aterramento do cabo coaxial. Após o aterramento da cerâmica, o transdutor foi submetido ao Analisador de Impedâncias, a fim de se observar possíveis mudanças nas frequências de ressonância e anti-ressonância dos modos de vibração do transdutor.

III.1.e. Compatibilização elétrica

A compatibilização elétrica ou acoplamento elétrico é usado para compatibilizar a impedância elétrica do transdutor com o instrumento que funciona como gerador de pulsos e/ou receptor. Nesta etapa é calculado o indutor L_0 , necessário para anular a capacitância intrínseca do transdutor na frequência de ressonância. Desenvolvendo a Equação 2.10, chega-se ao seguinte resultado:

$$L_0 = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_0} \quad (3.5)$$

Onde: C_0 é a capacitância da intrínseca da cerâmica, medida no Analisador de Impedâncias em uma frequência bem inferior à frequência de ressonância do modo espessura; e f_r é a frequência de ressonância do modo espessura.

Os valores de indutores necessários para cada transdutor foram calculados de acordo com a Equação 3.5, usando uma frequência baixa e longe da frequência de ressonância para excitar o transdutor, estes valores estão apresentados na Tabela III.5.

Após a montagem dos transdutores e a realização de testes para determinar seus respectivos desempenhos, também foram feitos testes com a colocação de indutores de valores baixos em paralelo com os transdutores, para observar o efeito de suas presenças nos parâmetros analisados.

O valor de indutor para fazer o acoplamento elétrico de cada transdutor foi selecionado de forma que o transdutor apresentasse o maior acoplamento eletromecânico (k) possível para o modo espessura de vibração, através da observação das curvas de módulo e fase da impedância *versus* frequência obtidas no Analisador de Impedâncias.

Tabela III.5. Valores dos indutores calculados para cada transdutor na frequência de 1kHz, a partir dos valores das capacitâncias intrínsecas.

Transdutor	#2	#4	#5	#6	#8	#10	#14	#15	#16	#18	#19
C_0 (nF) medido	2,00	1,10	1,62	1,75	1,70	1,80	1,10	1,50	1,26	1,75	1,46
L_0 (μH) calculado	1,0	1,9	1,3	1,2	1,2	1,1	1,9	1,4	1,6	1,2	1,4

III.1.f. Revestimento externo

O revestimento externo é feito com a colocação de um tubo de PVC externo ao conjunto formado pelo disco cerâmico, pelo tubo de PVC que serve de molde para a

camada de retaguarda, e pelo tubo de latão. Este tubo possui em uma das extremidades uma saída para o cabo coaxial que é conectado ao terminal BNC.

III.1.g. Camada de acoplamento acústico

Na construção da camada de acoplamento acústico (*matching layer*) dos transdutores foram utilizadas as espessuras $\lambda/4$ e $3\lambda/4$. A razão da relação do comprimento de onda com a espessura da camada de acoplamento acústico foi explicada no Capítulo II, no item II.1.a. O comprimento de onda λ é calculado pela Equação 3.6:

$$\lambda = \frac{c}{f_r} \quad (3.6)$$

Onde: c é a velocidade de propagação no meio, 1540m/s para a água; e

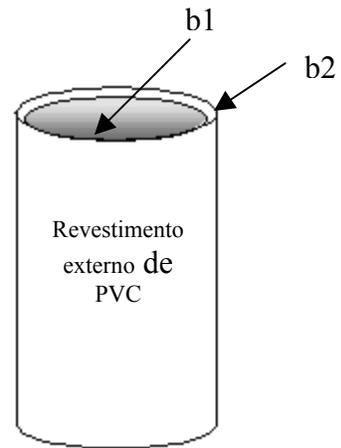
f_r é a frequência de ressonância do modo espessura.

A espessura da camada de acoplamento de cada transdutor foi calculada com a Equação 3.6 e foi usado um micrômetro digital (TESA Micromaster 50-75mm) para deslocar a face da cerâmica em relação à borda do tubo de PVC de revestimento externo (ver Figura III.3), de uma distância igual a $\lambda/4$ ou $3\lambda/4$. Em seguida, o volume definido pela face da cerâmica e a borda do tubo de revestimento foi preenchido pelo material da camada de acoplamento.

O material utilizado na camada de acoplamento foi epóxi de baixa viscosidade, que tem tanto a função de fazer a isolação do eletrodo da cerâmica com a água, impedindo a penetração de água no transdutor, como a compatibilização da impedância da cerâmica piezoelétrica com o meio de transmissão do sinal, por exemplo, a água. A impedância acústica do epóxi é igual a $2,76.10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$, enquanto as impedâncias do PZT-5A e da água são $33,7.10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $1,48.10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$, respectivamente (Hunt, Arditi e Foster, 1983).



(a)



(b)

Figura III.3. (a) Foto mostrando o micrômetro digital e os acessórios construídos em acrílico e latão usados para ajustar a espessura da camada de acoplamento acústico. (b) b1 mostra o eletrodo da face positiva da cerâmica e b2 indica a distância de $\lambda/4$ ou $3\lambda/4$ entre esta face e a borda do revestimento externo em PVC, ajustada com ajuda do micrômetro.

III.1.h. Colocação do cabo e conector BNC

Após a soldagem dos fios do cabo coaxial, preenche-se com epóxi a parte posterior do tubo de revestimento externo de PVC, de forma a isolar os fios da água.

O último procedimento é a colocação do terminal BNC na extremidade do cabo coaxial. Foram utilizados cabos coaxiais de diâmetro 4mm e comprimento 1,5m.

A Figura III.4 mostra um diagrama esquemático com os componentes de um transdutor de ultra-som de elemento piezoelétrico único. E na Figura III.5 é mostrada uma foto com as principais etapas de construção dos transdutores.

Depois de concluída a montagem dos transdutores, foram traçadas as curvas finais de módulo e fase da impedância *versus* frequência no analisador de impedâncias. As Figuras III.6 e III.7 mostram as curvas de módulo e fase da impedância *versus* frequência de um transdutor construído e a indicação das frequências de ressonância e de anti-

ressonância dos modos de vibração radial e espessura. Nesta etapa do trabalho as curvas foram obtidas usando o programa “al” desenvolvido em linguagem C pelo aluno de iniciação científica Gustavo Canuto, que permite a transferência dos dados, vindos do Analisador de Frequências, para a memória do microcomputador e a visualização das curvas foi feita em ambiente Matlab.

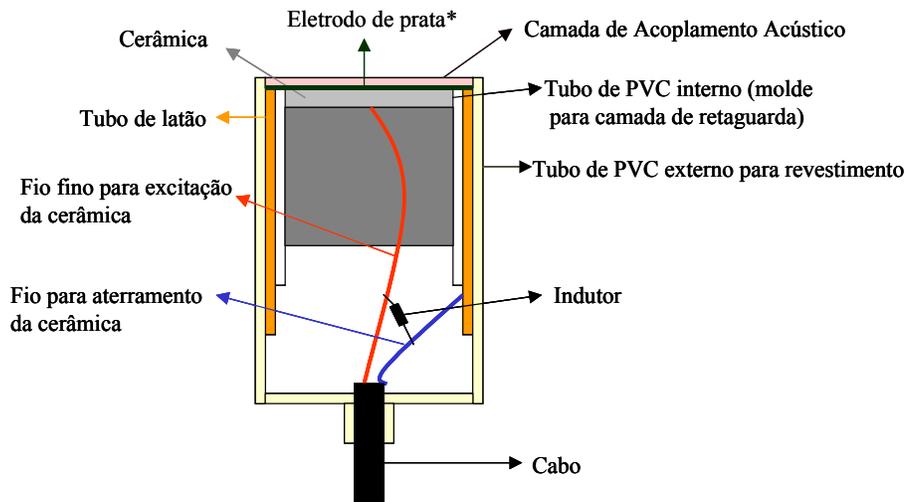


Figura III.4. Diagrama esquemático mostrando os componentes dos transdutores de ultra-som de elemento piezoelétrico único construídos neste trabalho.

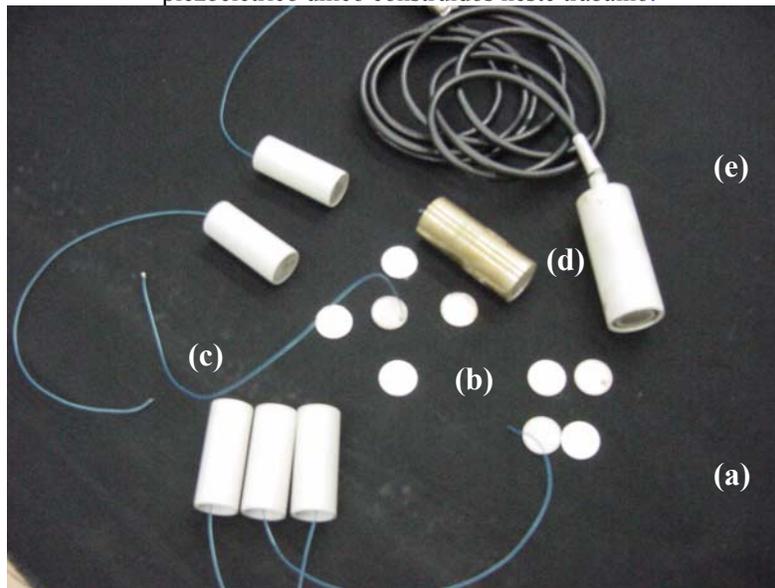
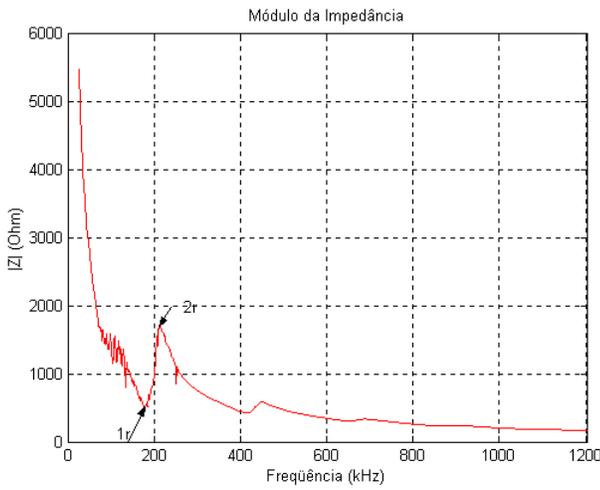
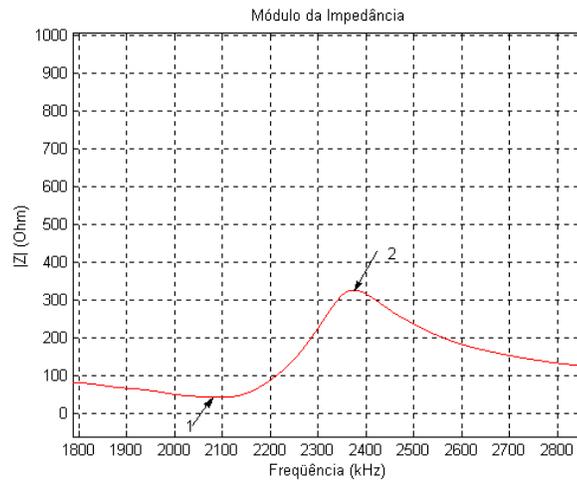


Figura III.5 Foto mostrando as etapas de construção de um transdutor de ultra-som com disco de cerâmica piezoelétrica. (a) disco de cerâmica com eletrodos de prata depositados em ambas as faces; (b) fio soldado no eletrodo da face negativa do disco; (c) colocação do tubo de PVC e da camada de retaguarda; (d) colocação do tubo de latão (contato elétrico com o eletrodo da face positiva); e (e) colocação do revestimento externo, da camada de acoplamento acústico e do cabo coaxial.



(a)



(b)

**1r =
ressonância do
modo radial**

**2r = anti-
ressonância do
modo radial
 $f_{ar}=207\text{kHz}$**

**1 = ressonância
do modo
espessura**

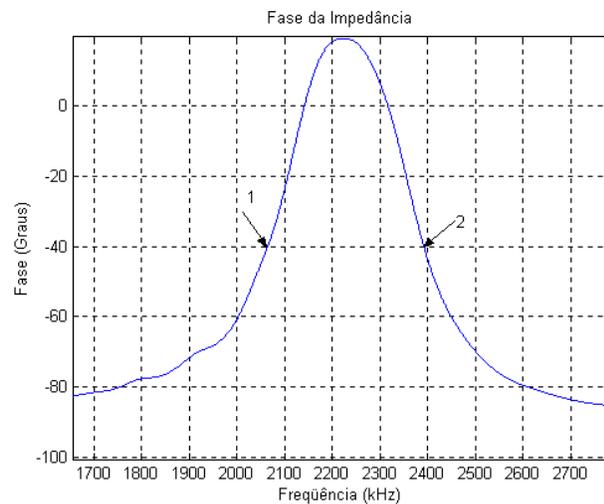
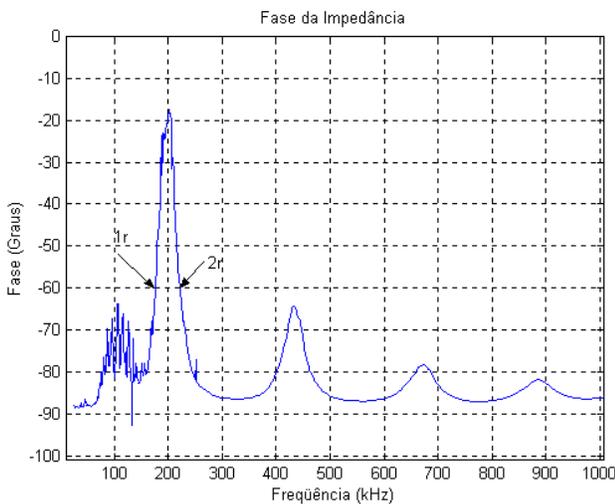
**2 = anti-
ressonância do
modo
espessura
 $f_{ar}=2400\text{kHz}$**

Figura III.6. Curvas de módulo da impedância *versus* frequência obtidas para o transdutor #6, mostrando as frequências de ressonância e de anti-ressonância dos modos de vibração radial (a) e espessura (b). Os valores de frequências de ressonância e de anti-ressonância de um modo de vibração são determinados observando-se as frequências em que ocorrem os valores mínimo e máximo de impedância, respectivamente.

(a)

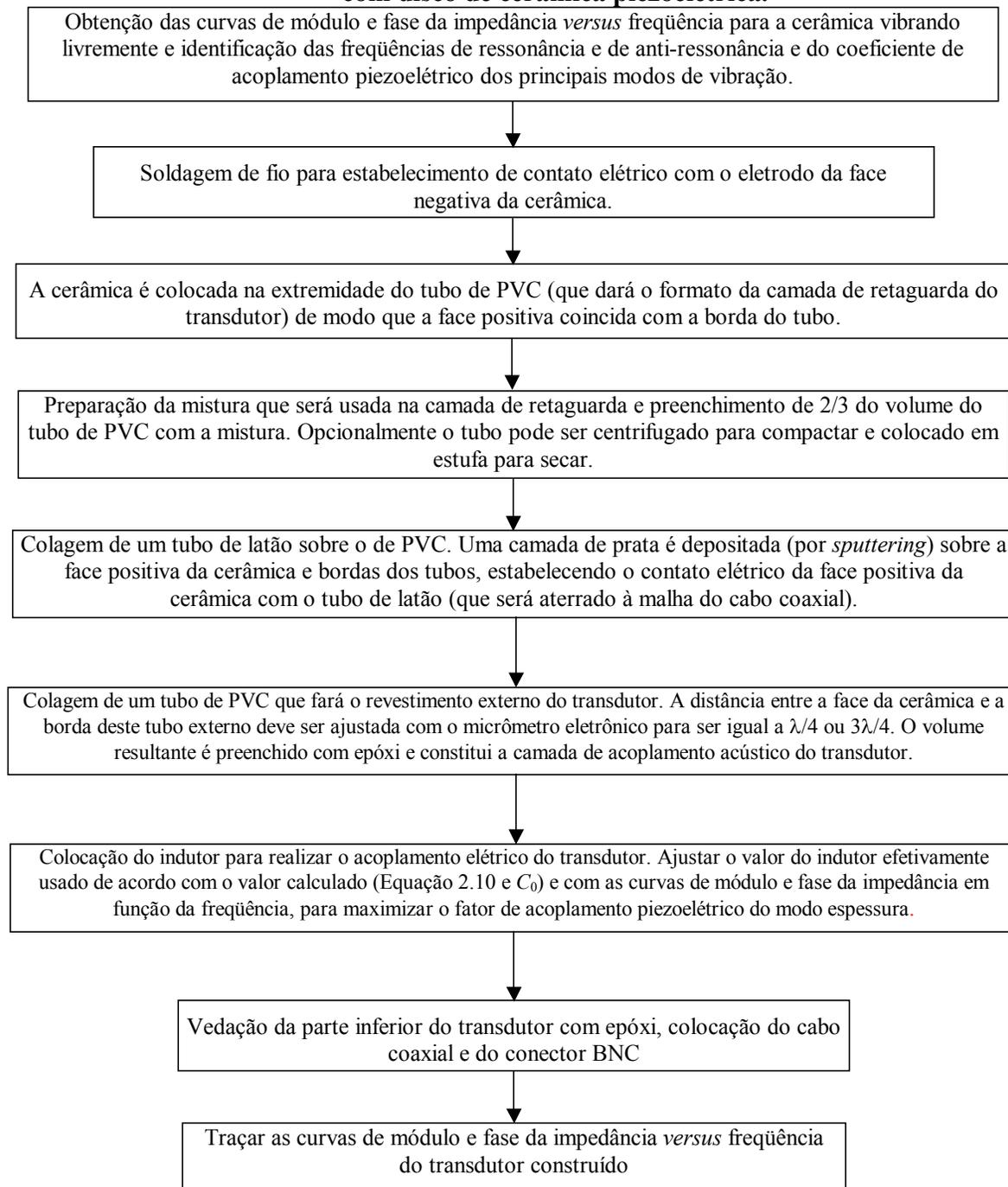
(b)

Figura III.7. Curvas de fase da impedância *versus* frequência obtidas para o transdutor #6, indicando as frequências de ressonância e de anti-ressonância dos modos de vibração radial (a) e espessura (b).



A seguir é apresentado o fluxograma que resume os procedimentos descritos nas etapas seguidas durante a construção dos transdutores de ultra-som deste trabalho.

Fluxograma mostrando as etapas de construção de um transdutor de ultra-som com disco de cerâmica piezoelétrica.



III.2. Caracterização dos transdutores

A segunda parte deste trabalho é a caracterização dos transdutores construídos no laboratório de ultra-som. Para determinar os parâmetros a serem verificados foram utilizadas como referência as normas ASTM E-1065 – 99 *Standard Guide for Evaluation Characteristics of Ultrasonic Search Units*, AIUM - *Acoustic Output Measurement and Labeling Standard for Diagnostic Ultrasound Equipment* de 1992 e a publicação AERO-TECH Reports - *Ultrasonic Transducer Performance Specification Test Methods, Definitions and Procedures* de 1980.

Os testes foram realizados no LUS usando o Sistema de Mapeamento de Campo Acústico, que é constituído de:

- um tanque com capacidade de 500l, onde é colocada água filtrada e deionizada, que possui um sistema de coordenadas XYZ movimentado por motores de passo que são controlados por programa de microcomputador. O programa que faz o controle da movimentação dos motores de passo é o MAPEAM.C, que já estava disponível no LUS, e que foi escrito em linguagem C;
- um osciloscópio digital da Tektronix modelo 2430A;
- um gerador de funções da Tektronix modelo TM515 que possui dois módulos, um para gerar a taxa de repetição de 100Hz dos *bursts*, e um para gerar os *bursts* de 1 ou 5 pulsos senoidais na frequência determinada para cada transdutor, usados para excitar os transdutores;
- um gerador de funções da Panametrics modelo 5072PR usado para excitar dois transdutores que fornecem um sinal de *trigger* para o osciloscópio, durante o processo de mapeamento;

- um amplificador de potência da Amplifier Research modelo 75A250 que amplifica a saída do gerador de funções (a saída de 0,5Vpp foi utilizada, e o gerador fornece até 10Vpp);
- e um microcomputador que controla a geração de estímulos elétricos para os transdutores e a aquisição dos dados durante os mapeamentos, além de controlar o deslocamento dos eixos do sistema de coordenadas XYZ.

Uma foto com os equipamentos utilizados no Sistema de Mapeamento de Campo Acústico é mostrado na Figura III.8.

O objetivo da caracterização dos transdutores construídos foi comparar os desempenhos dos transdutores, avaliando o efeito das diferentes camadas de retaguarda e de acoplamento acústico usadas. Os parâmetros medidos foram: medida da resposta em frequência, sensibilidade relativa em pulso-eco, medidas dos parâmetros do pulso acústico gerado e medidas dos parâmetros do campo ultra-sônico.



(a)



(b)

Figura III.8. Sistema de Mapeamento do Campo Acústico: tanque com o sistema de coordenadas XYZ (a), e os equipamentos (amplificador de potência, osciloscópio, geradores de funções e fontes de tensão) e microcomputador do sistema de controle (b).

III.2.a. Medida da resposta em frequência

A resposta em frequência ou espectro de frequência é a medida da amplitude da resposta em pulso-eco de um determinado alvo em função da frequência. Através da resposta em frequência pode-se determinar a frequência na qual o sinal do eco tem amplitude máxima (frequência de pico), a frequência central, e a faixa de passagem.

Existem dois meios de obter a resposta em frequência: A) com excitação por choque (pulso quadrado) e B) com excitação por *burst* senoidal. Ambos provêm resultados similares, segundo a norma ASTM E-1065.

A) Excitação por choque (pulso quadrado)

É baseada no princípio de que um pulso de choque aplicado ao transdutor produz um espectro de energia largo e que o eco de um determinado alvo reflete a distribuição de frequências que é característica deste transdutor. Foi utilizado um pulso retangular negativo na frequência de ressonância do modo espessura do transdutor, com taxa de repetição de 100Hz e amplificado até 66V.

B) Excitação por *burst* de pulsos senoidais

O princípio é a aplicação de *burst* de pulsos senoidais de amplitude e frequência conhecidas ao transdutor e determinar a resposta em pulso-eco. Nos testes com os transdutores construídos selecionamos *burst* de pulsos senoidais no gerador de funções, com 0,5Vpp, e número de pulsos em cada *burst* igual a um, na frequência de ressonância do modo espessura do transdutor, determinada no Analisador de Impedâncias, e com taxa de repetição igual a 100Hz.

Antes de ser aplicado ao transdutor, o *burst* foi amplificado até 53Vpp, no amplificador de potência (Amplifier Research 75A250).

III.2.a.1 Medida da largura de faixa

A largura de faixa ou faixa de passagem (*bandwidth* - BW) refere-se à largura de faixa funcional ou operacional do transdutor.

As frequências superior (f_s) e inferior (f_i) desta faixa são definidas na Norma ASTM E-1065, como os valores em que a amplitude da resposta do pulso-eco tem um decaimento de 6dB em relação à amplitude do eco na frequência de pico, f_p , ou seja, em relação à amplitude máxima do eco.

A frequência central (f_c) é determinada pela Equação 3.7.

$$f_c = \frac{f_i + f_s}{2} \quad (3.7)$$

E a largura de faixa (BW) pode ser calculada pela Equação 3.8.

$$BW = \frac{f_s - f_i}{f_c} * 100 \quad (3.8)$$

Para fazer determinar a largura de banda, a frequência central e o espectro de frequências foi usado o programa OSC2430 escrito em linguagem C, que também já estava disponível no LUS; este programa adquire os dados amostrados na tela do osciloscópio digital e os envia a um microcomputador para processamento posterior como programa LARGBANDA.m, desenvolvido no LUS pelo Dr. Joaquim Miguel Maia, em ambiente Matlab. O LARGBANDA calcula a transformada de Fourier do sinal acústico e fornece seu espectro de frequências e os valores da frequência central, da frequência de pico e da largura de banda.

Além das medidas da resposta em frequência dos ecos produzidos pelos transdutores construídos, também foram obtidos os resultados da resposta em frequência do

pulso ultra-sônico transmitido, gerado pelo transdutor e medido por um hidrofone de PVDF, com diâmetro de 1,5mm e faixa de passagem de 1 à 20MHz.

Nas Figuras III.10 e III.11, são apresentados os diagramas esquemáticos da realização das medidas de resposta em frequência dos transdutores construídos. Observa-se que no Sistema de Mapeamento de Campo Acústico do LUS o eixo Y corresponde ao eixo axial, enquanto que o eixo Z é mais comumente encontrado na literatura como sendo o eixo axial.

III.2.b. Características do Pulso Acústico

III.2.b.1. Pulso Acústico Gerado pelos Transdutores

Os pulsos acústicos gerados pelos transdutores construídos (transmissores) foram medidos por hidrofone pontual (receptor), no Sistema de Mapeamento de Campo Acústico, em resposta a formas de onda de excitação senoidal e retangular, de pulso único.

III.2.b.2. Pulso Acústico Medido em Pulso-Eco

Os ecos dos pulsos gerados pelos transdutores construídos, refletidos por refletores específicos, foram medidos para a avaliação de diversos parâmetros de desempenho. O alvo esférico empregado em pulso-eco deve ser uma esfera lisa de diâmetro de pelo menos 10λ , segundo a Norma ASTM E-1065. Nas medidas realizadas com os transdutores construídos foram usados um refletor esférico de aço-carbono com 25mm de diâmetro e um refletor plano (face plana de um cilindro de alumínio com 34mm de diâmetro e 40mm de espessura. O diâmetro do refletor esférico atende à recomendação da norma, pois o valor médio da

frequência central dos transdutores construídos é 2,1MHz, e portanto o comprimento médio de onda λ é 733 μ m e $10\lambda = 7,33$ mm.

III.2.b.3. Sensibilidade Relativa em Pulso-Eco (ou *insertion loss*, perda por inserção)

A sensibilidade relativa é definida pela Equação 3.9.

$$S_{rel} = 20 \log \frac{V_e}{V_a} \text{ (em dB)} \quad (3.9)$$

Onde: V_e é a tensão de resposta pico a pico do eco de um refletor especificado,
 V_a é a tensão pico a pico aplicada ao transdutor.

Tanto V_a como V_e são medidas na frequência nominal do transdutor (f_{nom}), que corresponde à frequência de ressonância do modo espessura.

As perdas por inserção foram medidas para cada transdutor com ou sem indutor, em pulso-eco, excitando o transdutor com um pulso quadrado negativo de amplitude 66V; o eco do sinal era proveniente de um alvo plano de alumínio.

III.2.b.4. Medição do *ringdown*

Para fazer a medição do *ringdown* o transdutor foi excitado por um único pulso na água e o eco, refletido por um alvo de alumínio plano, foi adquirido; a distância entre o transdutor e o alvo é igual à distância de separação entre o campo próximo e o campo distante z_n , indicada na Figura III.9. O *ringdown* é medido em ciclos e calculado pelo número de meios ciclos (n) mais um que a amplitude do pulso leva para decair a 10% (-20dB) do pico máximo. A equação para o cálculo do *ringdown* é:

$$Ringdown = \frac{n+1}{2} \quad (3.10)$$

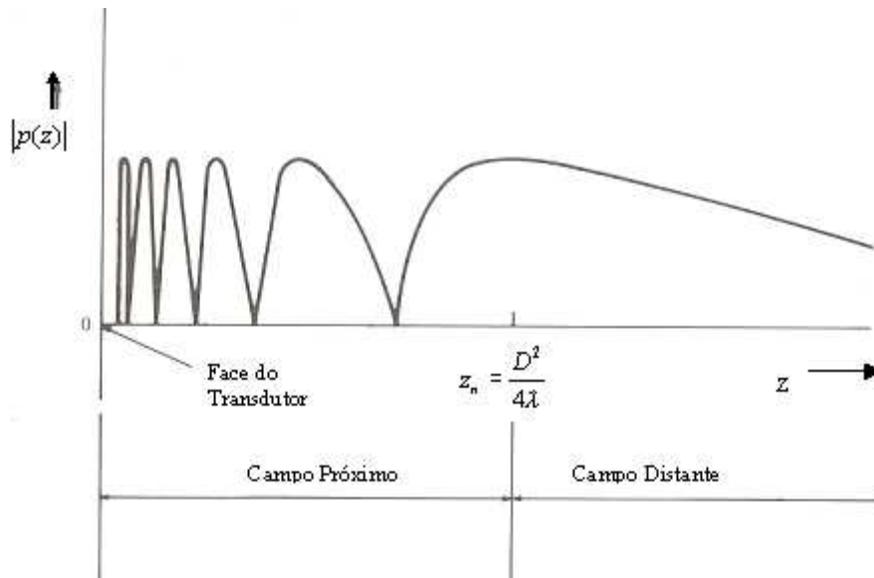


Figura III.9. z_n é o comprimento do campo próximo ou zona de Fraunhofer. Delimita a separação entre campos próximo e distante a partir da face do transdutor. D é o diâmetro do transdutor, z é a distância axial, λ é o comprimento de onda e $p(z)$ é a intensidade relativa do campo acústico (modificada de Christensen, 1976).

III.2.b.5. Resolução Axial

Para determinar a resolução axial dos transdutores, cada um deles foi excitado por um único pulso senoidal na frequência de ressonância do modo espessura do transdutor, e observou-se no osciloscópio a forma de onda do eco gerado pela propagação da onda acústica em chapas de acrílico com espessuras diferentes. As chapas de acrílico tinham as seguintes espessuras: 10mm, 6mm, 5mm, 3mm, 1.5mm e 1mm.

A resolução axial foi determinada verificando-se para até qual espessura os ecos eram bem discriminados na tela do osciloscópio.

III.2.c. Medidas dos parâmetros do campo ultra-sônico

Para fazer estas medidas podem ser usados dois procedimentos: em pulso-eco usando um alvo refletor esférico, ou em transmissão-recepção usando um hidrofone

receptor. O padrão de transmissão e o padrão de recepção do transdutor são, inicialmente, considerados idênticos e recíprocos. O transdutor pode ser excitado tanto por (pulso quadrado) choque quanto por *burst* de pulsos senoidais na frequência central do transdutor, f_c .

O hidrofone empregado deve possuir elemento ativo de diâmetro menor ou igual a 2λ da frequência central do transdutor. Se o elemento ativo for maior, deve-se usar um fator de correção para incluir a função diretividade do hidrofone. A resposta do hidrofone deve ser larga o suficiente para que o hidrofone não introduza resposta adversa. O hidrofone de PVDF utilizado no Laboratório de Ultra-som (LUS) para a realização de todas as medidas de campo ultra-sônico foi fabricado pela Precision Acoustics, tem diâmetro 1,0mm e está de acordo com o que é exigido na norma ASTM E-1065.

Transdutores não-focalizados

Para os transdutores não-focalizados, que é o caso dos transdutores construídos neste trabalho, quatro parâmetros importantes do campo acústico são usados para avaliar as características do transdutor: a) área ativa; b) perfil transversal; c) perfil axial, e d) espalhamento do feixe ultra-sônico. Os parâmetros como área ativa e espalhamento do feixe são medidos em diferentes níveis de intensidade do campo acústico, dependendo da técnica empregada. Em medidas realizadas em pulso-eco usa-se -6dB abaixo do pico de resposta, e com hidrofone usa-se -3dB abaixo do pico de resposta, segundo a Norma ASTM E-1065.

III.2.c.1. Medidas em Pulso-Eco

A Figura III.10 mostra o esquema de ligação de transdutor e equipamentos do Sistema de Mapeamento de Campo Acústico para obtenção dos parâmetros do campo ultrassônico usando pulso-eco com refletor esférico ou plano.

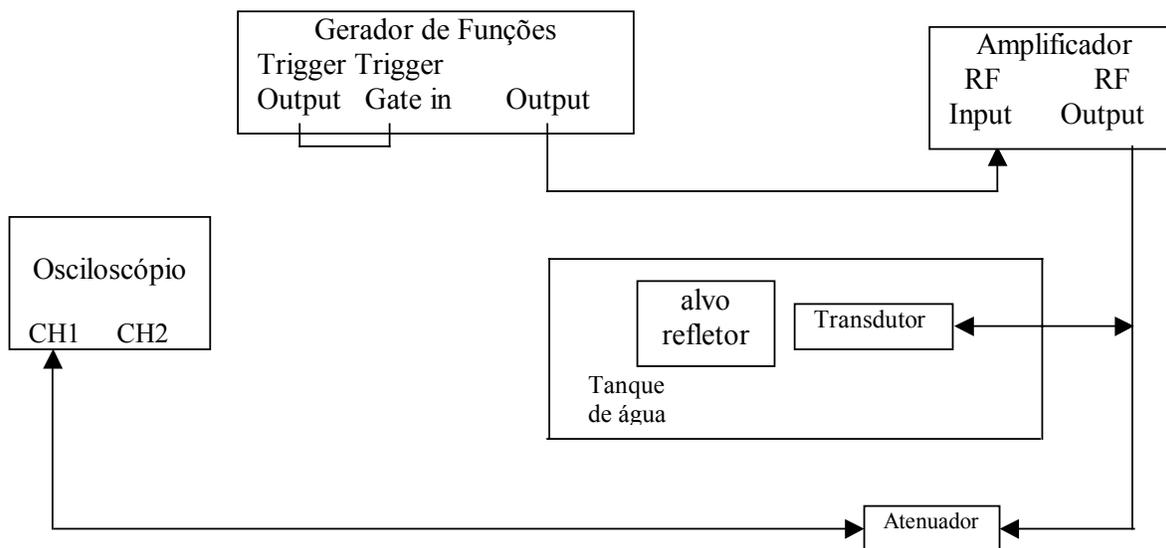


Figura III.10 - Diagrama mostrando o esquema de ligação de transdutor e equipamentos do Sistema de Mapeamento de Campo Acústico para a obtenção dos parâmetros em pulso-eco.

III.2.c.2. Medidas feitas com o hidrofone no modo transmissão/recepção

Durante a realização das medidas feitas com o hidrofone, o transdutor transmissor (sob teste) permanece numa posição fixa no tanque (Figura III.11), enquanto o transdutor receptor (hidrofone) é movimentado no sistema XYZ por motores de passo que são controlados por microcomputador.

Para fazer o alinhamento entre o transdutor e o hidrofone, este deve ser posicionado de forma que no campo distante se obtenha uma resposta máxima. Isto é obtido quando o hidrofone está alinhado com o centro do transdutor, isto é, quando o hidrofone está alinhado com o eixo axial do transdutor transmissor.

O esquema de interligação de equipamentos e transdutores utilizados para obtenção dos parâmetros do campo no modo transmissão/recepção é apresentado na Figura III.11. No Gerador de Funções são selecionados o sinal de excitação do transdutor transmissor (forma de onda, amplitude e frequência) e a taxa de repetição deste sinal; dele também é obtido o sinal de sincronização (*trigger output*) para o equipamento da Panametrics que gera um sinal de sincronismo para o osciloscópio (através dos transdutores 1 e 2), necessário durante o mapeamento; o sinal amplificado pelo Amplificador de Potência é aplicado no transdutor sob teste e o hidrofone recebe o pulso acústico produzido; a saída do hidrofone é amplificada (um ou dois estágios) é digitalizada no canal 2 do Osciloscópio e é transferida para o microcomputador.

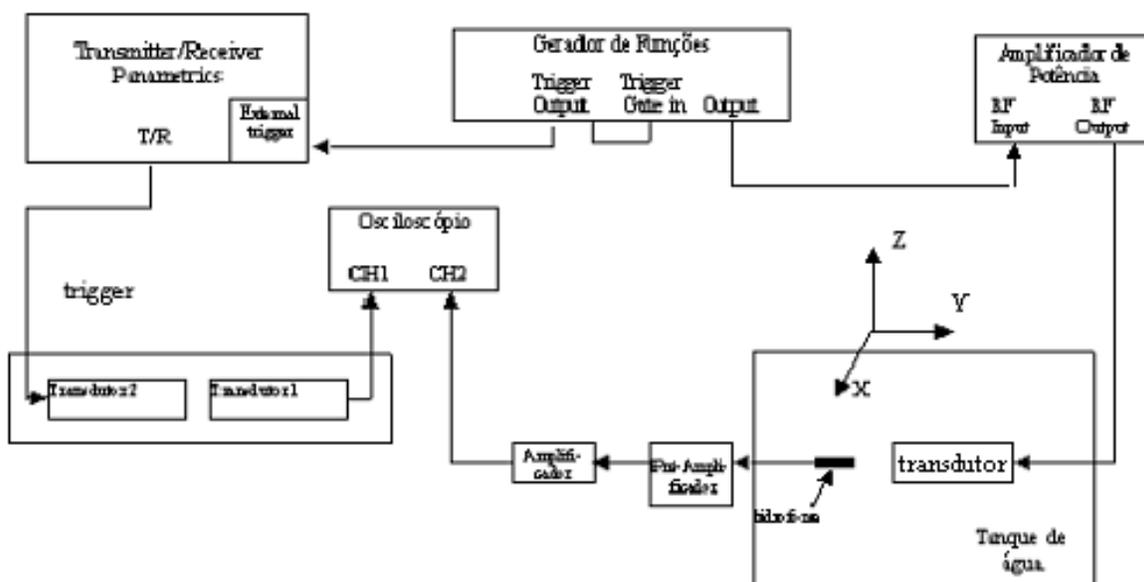


Figura III.11. Esquema de ligação dos transdutores transmissor (sob teste) e receptor (hidrofone pontual de PVDF) e dos equipamentos para realização de medidas em transmissão/recepção.

III.2.c.3. Área Ativa

Para obter a área ativa (*aperture size*) do transdutor, o hidrofone faz uma varredura do campo ultra-sônico num plano paralelo à face do transdutor, plano XZ, a uma distância de 1,5mm da face do transdutor. A área ativa é definida como a largura do contorno do feixe acústico de intensidade -3dB abaixo da intensidade média da resposta medida no centro do transdutor, menos o raio do hidrofone (Norma ASTM E1065).

III.2.c.4. Perfil transverso do campo acústico

É obtido realizando o mapeamento do campo com o hidrofone de PVDF no plano XZ em determinadas distâncias da face do transdutor. Para estabelecer o padrão ou a simetria do feixe acústico, o campo acústico deve ser traçado em duas direções ortogonais na transição campo próximo campo distante e/ou em outras distâncias selecionadas. A seleção de distâncias da face do transdutor, como a transição campo próximo campo distante (z_n), ou outras posições como $z_n/2$, $z_n/3$ ou $2z_n$, é mais apropriada para excitação por *burst* de pulsos senoidais; já para excitação com pulso quadrado, às distâncias 25, 75 e 125mm são mais apropriadas (ASTM E-1065). O perfil transverso foi obtido pelo mapeamento dos transdutores no plano XZ (30mm x 30mm) em distâncias definidas por $z_n/2$, $z_n/3$ e z_n , $2z_n$, $3z_n$ e $4z_n$. A distância z_n , indicada na Figura III.9, foi calculada pela Equação 3.11 indicada na norma ASTM E-1065. Em Zemanek (1970), no entanto, o cálculo de z_n possui o fator 0,75 multiplicando a Equação 3.11.

$$z_n = \frac{d^2}{4\lambda} \quad (3.11)$$

Onde: d é o diâmetro do transdutor; e

λ é o comprimento de onda do campo.

III.2.c.5. Perfil axial do campo acústico

É obtido pelo mapeamento da intensidade do campo acústico, em função da distância (Y) da face do transdutor. O perfil axial pode ser obtido mapeando-se o campo acústico ao longo do eixo axial, isto é, movendo-se o hidrofone ao longo deste eixo e adquirindo a resposta da pressão axial em função da distância, ou a partir do mapeamento do campo no plano XY ASTM E-1065.

O perfil axial de cada um dos transdutores construídos foi medido a partir do mapeamento no campo acústico no plano XY (30mm x 150mm).

III.2.c.6. Espalhamento do Campo

É a medição da divergência do feixe acústico em função de uma distância além da transição entre campo próximo e campo distante. O espalhamento do feixe pode ser determinado pelo mapeamento do campo acústico no plano XY ou pela medida do perfil lateral do campo (ao longo do eixo X, centralizado no eixo axial), com hidrofone pontual, em duas ou mais distâncias no campo distante. Este procedimento visa estabelecer a largura do feixe ultra-sônico com um valor específico, em dB, abaixo do pico de resposta. Segundo a Norma ASTM E1065, o espalhamento do feixe (2ψ) é calculado como:

$$2\Psi = 2 \arctan W(z_0 - z_a) \quad (3.12)$$

Onde: z_a é uma distância além da transição entre campo próximo e campo distante (z_n);

z_c é uma distância determinada além de Z_a ; e

W é a medida do aumento da largura do campo ultra-sônico.

A avaliação do espalhamento do campo de cada um dos transdutores construídos foi realizada a partir do mapeamento do campo acústico no plano XY (30mm x 150mm). A Figura III.12 mostra o esquema de obtenção do espalhamento do feixe para um determinado perfil de campo ultra-sônico. Onde pode ser observado, que no campo distante o feixe tem um espalhamento com um ângulo ψ , e W é a abertura do feixe. O ângulo medido (ψ) é função da distância W .

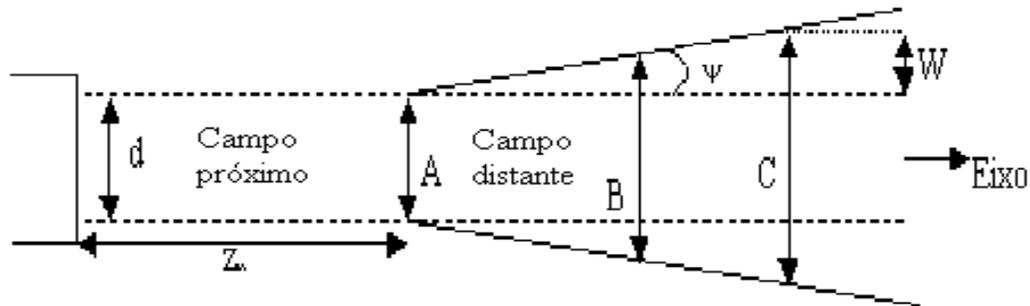


Figura III.12. Diagrama esquemático da medida de espalhamento do feixe acústico. d é o diâmetro do transdutor. A , B e C são as medidas da largura do campo acústico em posições diferentes ao longo do campo distante (modificada de ASTM E-1065).

III.2.d. Testes com o transdutor após a colocação do indutor

Para observar o efeito da colocação do indutor, de acoplamento elétrico, em paralelo com o transdutor, nos parâmetros de caracterização do desempenho do transdutor, foram repetidos alguns dos testes, após a colocação dos indutores apropriados. Foram medidos o perfil axial dos transdutores e o perfil transversal numa distância de 50mm da face do transdutor usando o sistema transmissão/recepção com hidrofone calibrado. Obteve-se também o sinal acústico, medido por hidrofone, e o eco, recebido a partir de um alvo plano,

e a largura de faixa (BW) de cada transdutor com e sem indutor, excitando-se o transdutor com um pulso quadrado negativo de amplitude -66 V.

III.2.e. Observações

As cerâmicas #1 e #11 se quebraram durante o encaixe destas no tubo de PVC que serve como molde para a camada de retaguarda. Os transdutores construídos com as cerâmicas #3, #7, #9 se comportaram como um circuito aberto na verificação de módulo de impedância e fase *versus* frequência; o problema provável foi o ressecamento da camada de cola condutiva que estava sendo usada para fazer o contato do eletrodo da cerâmica com o tubo de latão. A cerâmica 12 ficou como reserva, caso fosse necessário construir um novo transdutor. Os transdutores #13 e #17 foram eliminados devido a problemas após a construção. Portanto, no capítulo seguinte, serão apresentados os resultados obtidos com a avaliação de 11 transdutores construídos a partir dos 19 discos iniciais de cerâmica piezoelétrica.

IV. Resultados

IV.1. Construção dos Transdutores

IV.1.a. Documentação das cerâmicas piezoelétricas

Foram utilizados 19 discos de cerâmica piezoelétrica do tipo PZT5-A. Todos os discos tiveram os valores de frequências de ressonância e anti-ressonância dos modos de vibração determinados no Analisador de impedância (HP-4492A LF Impedance Analyzer 5Hz-13MHz). A partir destes valores foram calculados os coeficientes efetivos de acoplamento eletromecânico para os modos de vibração radial e espessura, os mais fortemente acoplados. Na Tabela IV.1 são apresentados os valores medidos das frequências de ressonância e de anti-ressonância e os valores dos coeficientes de acoplamento eletromecânico calculados para as cerâmicas vibrando livremente. No Apêndice A são apresentadas as curvas de módulo e fase da impedância *versus* frequência obtidas para todas as cerâmicas vibrando livremente.

O valor da frequência de ressonância para as cerâmicas vibrando livremente no modo espessura ficou próximo a 2100kHz, com coeficiente de acoplamento em torno de 0,432; e o valor da frequência de ressonância do modo radial ficou próximo a 165kHz, com coeficiente de acoplamento em torno de 0,533.

IV.1.b. Documentação das fases de construção dos transdutores de ultra-som

As curvas de módulo e fase da impedância foram obtidas também após cada fase de construção dos transdutores, para acompanhar possíveis alterações nos modos de vibração, em relação aos valores determinados para as cerâmicas vibrando livre. Na Tabela IV.2 são apresentados os valores medidos e calculados para os transdutores, já completamente montados,

Tabela IV.1. Freqüências de ressonância e anti-ressonância e coeficiente de acoplamento dos modos de vibração de cada cerâmica vibrando livremente.

Cerâmicas																			
Modo Radial 25kHz-1025kHz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
f_r (kHz)	163,5	162,4	165,4	163,4	162,7	164,0	162,1	165,5	167,5	167,9	166,0	165,6	164,5	171,6	167,5	168,4	165,6	167,0	166,5
$ Z $ (Ω)	39,8	35,0	34,7	34,23	35,7	35,9	39,9	36,2	35,1	46,7	36,0	40,6	31,5	41,8	37,7	38,4	34,6	37,3	34,8
ϕ_r (graus)	0,02	0,00	0,00	0,01	0,05	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
f_{ar} (kHz)	194,1	193,8	198,0	197,2	193,7	195,3	194,4	194,9	201,6	193,0	199,2	196,0	195,3	195,1	195,6	197,9	196,8	197,3	197,2
$ Z $ (k Ω)	38,7	41,7	44,2	49,4	43,4	37,8	45,6	31,9	50,2	34,0	32,5	37,3	38,8	29,6	36,2	38,2	41,2	35,8	35,8
ϕ_{ar} (graus)	0,08	0,03	0,09	0,04	0,08	0,03	0,02	0,07	0,01	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
k	0,511	0,545	0,550	0,559	0,542	0,543	0,552	0,528	0,557	0,493	0,553	0,535	0,539	0,476	0,517	0,525	0,538	0,533	0,536
Cerâmicas																			
Modo Espessura 1000kHz-2500kHz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
f_r (kHz)	2108	2103	2100	2093	2094	2119	2082	2197	2111	2070	2096	2072	2287	2287	2095	2079	2108	2187	2188
$ Z $ (Ω)	8,0	6,4	6,6	6,0	6,0	6,4	6,9	7,2	7,8	10,3	6,8	12,3	5,0	5,6	7,4	10,4	7,7	8,0	7,0
ϕ_r (graus)	0,01	0,04	0,00	0,07	0,00	0,01	0,00	0,01	0,05	0,01	0,02	0,01	-0,01	0,01	0,01	-0,01	0,01	0,02	0,03
f_{ar} (kHz)	2304	2349	2335	2344	2340	2355	2331	2451	2354	2249	2364	2314	2465	2465	2299	2287	2359	2426	2431
$ Z $ (k Ω)	1,66	2,67	1,92	3,41	2,28	2,42	2,68	2,17	3,69	1,65	1,49	2,21	2,39	1,56	1,32	1,75	2,00	1,18	2,26
ϕ_{ar} (graus)	0,03	0,00	0,02	0,05	0,05	0,00	0,02	0,00	0,04	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	-0,01	0,01	0,01
k	0,404	0,445	0,437	0,450	0,446	0,439	0,450	0,443	0,442	0,390	0,463	0,445	0,373	0,373	0,412	0,417	0,450	0,432	0,436

Tabela IV.2. Frequências de ressonância e anti-ressonância e coeficiente de acoplamento dos modos de vibração dos transdutores.

Modo Radial 25kHz-1025kHz	#2	#4	#5	#6	#8	#10	#14	#15	#16	#18	#19
f_r (kHz)	193	166	169	186	193	137	144,5	141,2	151,5	174	160,5
ϕ_r (graus)	-35,93	-60,35	-64,21	-35,65	-36,26	-63,35	-59,9	-42,7	-25,3	-15	-29,66
C (F)	5,63E-09	2,70E-11	2,24E-09	2,75E-09	5,87E-09	2,32E-09	2,11E-09	2,35E-09	4,55E-09	2,34E-09	2,42E-09
Z (Ohms)	462,5	0,4875	460,8	524,7	456,9	568	599	710	526	394	826,4
f_{ar} (kHz)	216	200	199	215	222	179,3	161,5	196,2	168,05	199	171
ϕ_{ar} (graus)	-37,61	-57,85	-62,69	-46,69	-41,89	-56,38	-36,78	-57,6	-34	-18,8	-62,6
k	0,449	0,558	0,528	0,501	0,494	0,645	0,447	0,694	0,433	0,485	0,345
Z (Ohms)	2034	1060	981	1758	2228	1817	1540	1870	1990	986	1320
Modo Espessura 1000kHz-2500kHz	#2	#4	#5	#6	#8	#10	#14	#15	#16	#18	#19
f_r (kHz)	2081	2122	2029	2051	2186	2059	2192	2031,5	2020	1996	2180
ϕ_r (graus)	-28,34	-47,36	-52,89	-41,31	-24,74	-41,1	-52,28	-43,67	-41,22	-39,07	-22,33
C (F)	1,29E-09	1,48E-07	2,23E-09	1,27E-09	5,72E-09	1,82E-09	1,59E-09	1,82E-09	1,96E-09	-2,59E-09	4,57E-09
Z (Ohms)	39,93	39,67	43,4398	46,55	35,51	64,74	57,81	61,11	61,09	39,72	42,08
f_{ar} (kHz)	2368	2377	2273	2352	2484	2359	2540	2362,5	2326	2176	2449,36
ϕ_{ar} (graus)	-44,52	-48,22	-53,69	-45,69	-36,24	-47,47	-49,87	-46,57	-39,94	-41,95	-33,65
k	0,477	0,451	0,451	0,489	0,475	0,488	0,505	0,510	0,496	0,398	0,456
Z (Ohms)	343,8	112,12	100,75	331,1	323,8	246,5	185	245	286,6	85,95	355,1

Legenda: *Itálico* = transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de alumina
 Negrito = transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de tungstênio
 Preto = transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi, pó de tungstênio e pó de alumina.

A legenda da Tabela IV.2 será utilizada em todas as tabelas que serão apresentadas neste capítulo.

utilizados neste trabalho. Algumas cerâmicas, e mesmo transdutores em diferentes fases da construção, foram danificados, sendo que 11 transdutores foram efetivamente utilizados.

Nas curvas de módulo e fase da impedância *versus* frequência, traçadas após a construção da camada de retaguarda, pôde ser observada algumas alterações, como a curva de fase não passar por zero nas frequências de ressonância e anti-ressonância para alguns transdutores construídos.

Comparando as Tabelas IV.2 e IV.1, observa-se que os valores das frequências de ressonância e anti-ressonância dos transdutores montados apresentaram pequenas alterações:

- no modo de vibração radial, para a maior parte dos transdutores, houve diminuição destes valores, em relação à cerâmica livre;

- no modo de vibração espessura, a frequência de ressonância diminuiu para a maioria dos transdutores e a frequência de anti-ressonância aumentou para os transdutores #2, #4, #8, #10, #14, #15, #16 e #19, permaneceu a mesma para o transdutor #6, e diminuiu para os demais transdutores.

A Tabela IV.2 também apresenta os valores das capacitâncias dos transdutores, medidos no analisador de impedância, na frequência de ressonância do modo espessura de vibração de cada transdutor. Estes valores foram utilizados posteriormente para calcular os valores dos indutores a serem colocados em paralelo aos transdutores, para o acoplamento elétrico de cada transdutor.

IV.1.b.1. Acoplamento elétrico dos transdutores (*electrical matching*)

Após a montagem dos transdutores, foram obtidas novamente as curvas de módulo e fase da impedância *versus* frequência, e foi observado que estas não apresentavam parte indutiva. Este tipo de comportamento da curva de fase *versus* frequência é modificado pela correção do

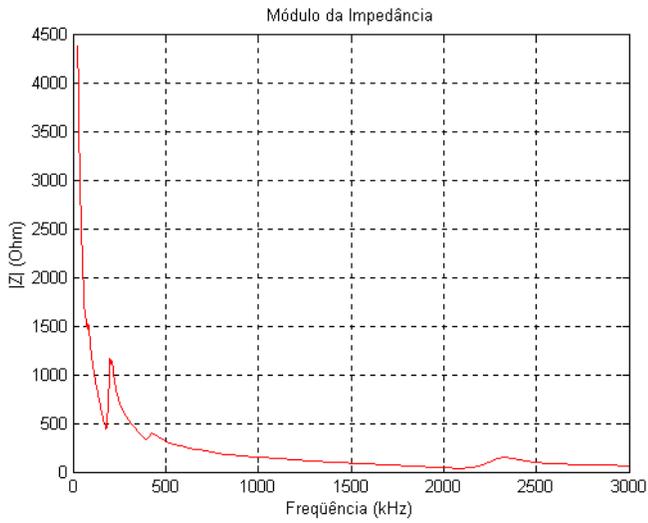
acoplamento elétrico do transdutor. Algumas medidas de Caracterização dos Transdutores foram realizadas antes da colocação do indutor em paralelo ao transdutor, e repetidas após a realização do acoplamento elétrico.

O indutor para cada transdutor foi selecionado de forma que o transdutor obtivesse, no modo espessura, o maior acoplamento eletromecânico (k) possível; isso pôde ser constatado através do traçado das novas curvas de módulo da impedância e fase *versus* frequência.

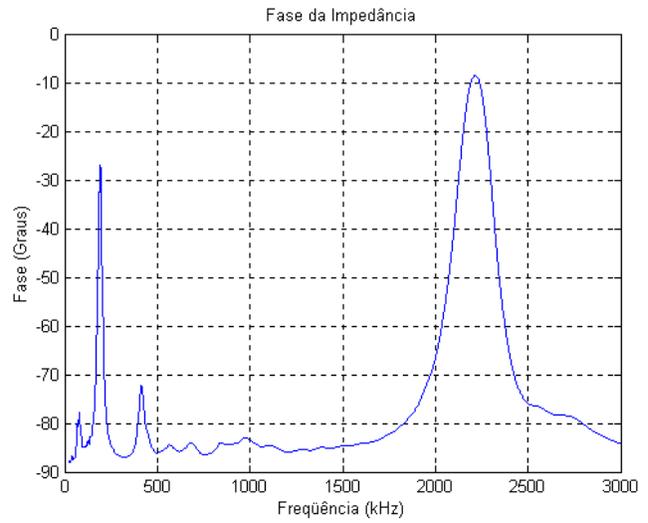
Os valores dos indutores foram calculados através da Equação (3.5) e estão mostrados na Tabela IV.3 juntamente com o valor dos indutores efetivamente usados. Alguns valores de indutores usados na montagem dos transdutores são bastante diferentes dos valores calculados. Como foi explicado, buscou-se ajustar um valor de indutor que favorecesse o modo espessura de vibração do transdutor. Na Figura IV.1 são apresentadas as curvas de módulo e fase da impedância para o transdutor #15, sem acoplamento elétrico e com acoplamento elétrico.

Tabela IV.3. Valores dos indutores calculados e usados na montagem dos transdutores.

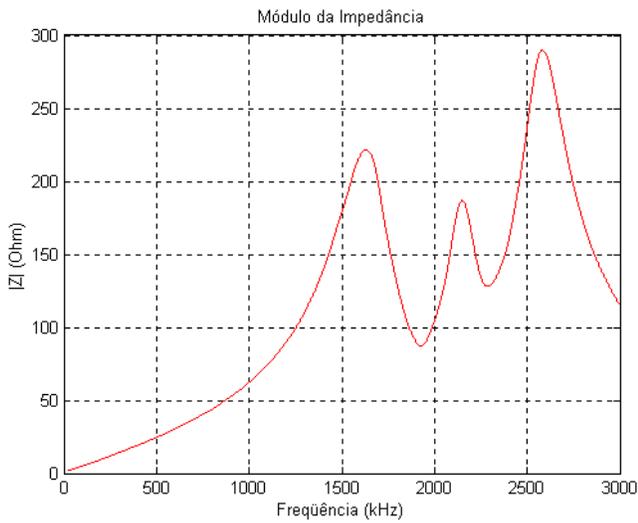
Transdutor	L_0 (μH) calculado	L_0 (μH) usado
#2	4,53	4,0
#4	3,81E-02	5,8
#5	2,76	4,4
#6	4,37	5,8
#8	9,27E-01	4,0
#10	3,29	6,6
#14	3,32	9,6
#15	3,37	7,3
#16	3,17	6,9
#18	2,46	5,5
#19	1,17	4,4



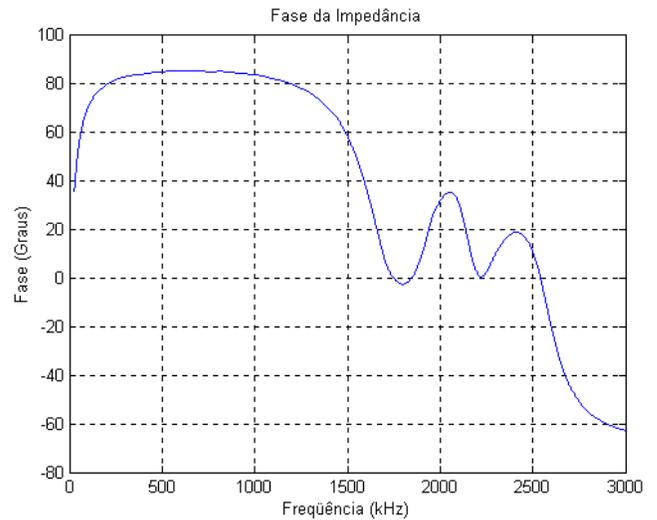
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura IV.1. Curvas de módulo e fase da impedância *versus* frequência para o transdutor #15, (a) e (b) antes do acoplamento elétrico e (c) e (d) com indutor L_0 colocado em paralelo ao transdutor.

IV.1.b.2. Coeficiente de acoplamento eletromecânico

Comparando o coeficiente de acoplamento eletromecânico (k), dos modos de vibração radial e espessura das cerâmicas vibrando livre (Tabela IV.1) e dos transdutores construídos, antes do acoplamento elétrico (Tabela IV.2), temos que:

- os transdutores construídos com a camada de retaguarda de epóxi e alumina (#6, #16, #18 e #19) apresentaram um decréscimo no valor de k do modo radial, e um aumento no valor de k no modo espessura;
- os transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi, alumina e tungstênio apresentaram um aumento de k no modo espessura, e uma diminuição de k do modo radial, com exceção do transdutor #14;
- os transdutores construídos com a camada de retaguarda com epóxi e tungstênio apresentaram um aumento de k do modo espessura e uma diminuição de k no modo radial, exceto o transdutor #10, que apresentou um aumento de k no modo radial;
- ao serem avaliados no analisador de impedância, os transdutores construídos não apresentaram parte indutiva nas curvas de módulo e fase da impedância *versus* frequência, com exceção do transdutor #2.

Após a colocação do indutor nos transdutores, desapareceram os modos de vibração, exceto o modo espessura (Figura IV.1 (c) e (d)), e como pode ser observado pela Tabela IV.4, o fator de acoplamento eletromecânico deste modo aumentou para todos os transdutores.

Tabela IV.4. Valor do coeficiente de acoplamento eletromecânico do modo espessura para os transdutores construídos sem indutor e com indutor; transdutores construídos com camada de acoplamento acústico com espessura $3\lambda/4$ estão indicados em cinza.

<i>Transdutor</i>	<i>k</i>	<i>k (indutor)</i>	<i>Transdutor</i>	<i>k</i>	<i>k (indutor)</i>	Transdutor	k	k (indutor)
#16	0,496	0,601	#4	0,451	0,607	#8	0,475	0,576
#18	0,398	0,466	#14	0,505	0,470	#10	0,488	0,599
#19	0,456	0,667	#15	0,510	0,556	#5	0,451	0,635
#6	0,489	0,574	#2	0,477	0,684			

IV.1.b.3. Impedância acústica

Analisando a impedância acústica resultante das três composições de camada de retaguarda, a que apresentou maior impedância, como era esperado, foi a camada de retaguarda constituída de epóxi e pó de tungstênio, seguida pela camada de retaguarda constituída por epóxi, alumina e tungstênio; e a que apresentou menor impedância foi a camada de retaguarda constituída por epóxi e alumina.

A Tabela IV.5 apresenta os valores das impedâncias acústicas de cada uma das misturas que compõem a camada de retaguarda dos transdutores.

Tabela IV.5. Valores das impedâncias acústicas das três composições da camada de retaguarda.

Composição da camada de retaguarda	$Z_0(\text{kg/m}^2\text{s})$	Composição da camada de retaguarda	$Z_0(\text{kg/m}^2\text{s})$	Composição da camada de retaguarda	$Z_0(\text{kg/m}^2\text{s})$
<i>Epóxi e alumina</i>		Epóxi, alumina e tungstênio		Epóxi e tungstênio	
<i>Transdutor #6</i>	5,55E+06	Transdutor #2	1,44E+07	Transdutor #5	1,45E+07
<i>Transdutor #16</i>	5,58E+06	Transdutor #4	1,42E+07	Transdutor #8	1,68E+07
<i>Transdutor #18</i>	5,58E+06	Transdutor #14	1,42E+07	Transdutor #10	1,63E+07
<i>Transdutor #19</i>	5,58E+06	Transdutor #15	1,42E+07		

IV.2. Caracterização dos Transdutores

IV.2.a. Resposta em frequência (Largura de faixa, Frequência central, Frequência de pico)

Pulsos acústicos gerados pelos transdutores

Inicialmente foram obtidos os pulsos acústicos gerados pelos transdutores construídos e recebidos por hidrofone pontual de PVDF. Os transdutores foram excitados por um pulso retangular negativo de amplitude 66V e 240ns de duração. As Figuras IV.2 a IV.4 mostram o pulso gerado por cada transdutor construído e medido pelo hidrofone a 50mm de distância da face do transdutor.

A partir dos pulsos acústicos, o programa LARGBANDA determina a largura da faixa ou da banda de passagem de cada transdutor, bem como as frequências de pico e central. A Tabela IV.6 mostra os valores da largura de faixa do sinal acústico gerado por cada transdutor.

Em cada grupo de transdutores construídos com o mesmo tipo de camada de retaguarda, o transdutor construído com camada de espessura $3\lambda/4$ foi o que apresentou a menor amplitude pico a pico. Entre os três grupos de transdutores, o de transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e tungstênio gerou as menores amplitudes pico a pico.

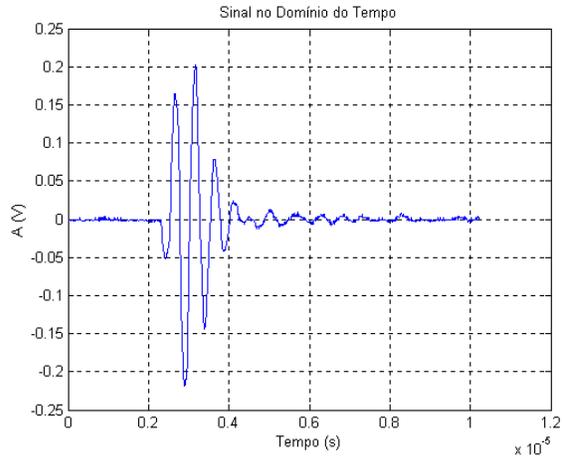
Os transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de alumina (#6, #16 e #19) apresentaram pulsos acústicos bastante semelhantes, mas com amplitudes diferentes, entre 400mVpp e 900mVpp. O transdutor #18 apresentou formato de pulso acústico diferente e a menor faixa de passagem entre todos os transdutores construídos (37,30%).

Os transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi, pó de alumina e pó de tungstênio apresentaram pulsos acústicos com formato, amplitudes (250mVpp e 1Vpp) e larguras de banda bastante diferentes entre si. O transdutor #14 apresentou a maior largura de banda entre todos os transdutores construídos: 83%.

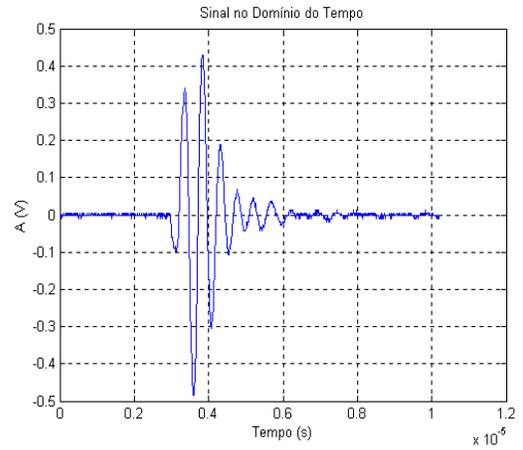
De acordo com a norma, a avaliação da largura de banda é feita com o eco recebido pelo transdutor (resultados apresentados no próximo item). Os pulsos acústicos gerados pelos transdutores construídos foram medidos com hidrofone pontual, e suas respostas em frequência foram calculadas para avaliar o funcionamento dos transdutores. Alguns resultados discrepantes num dado grupo, como amplitudes variadas e largura de banda menor (transdutor #18), ou entre todos os transdutores, como a largura de banda de 83% do transdutor #14, podem ser justificados pela dificuldade da construção das camadas de retaguarda e principalmente da espessura da camada de acoplamento acústico. As espessuras das camadas de $\lambda/4$ e $3\lambda/4$, da ordem de μm , melhoram o acoplamento acústico dos transdutores, mas produzem uma sintonização do transdutor, reduzindo sua faixa de passagem. Mesmo sendo elaboradas com cuidado, pode ter havido uma variação na espessura da camada do transdutor #14, de modo a resultar num valor de largura de banda aproximadamente o dobro dos demais transdutores. As medidas que resultaram em parâmetros muito diferentes foram refeitas ao menos mais uma vez, para verificar se os resultados se repetiam, como no caso dos transdutores #14 e #18.

Tabela IV.6. Largura de faixa dos pulsos acústicos gerados pelos transdutores e medidos por hidrofone de PVDF; transdutores construídos com camada de acoplamento acústico com espessura de $3\lambda/4$ estão indicados em cinza.

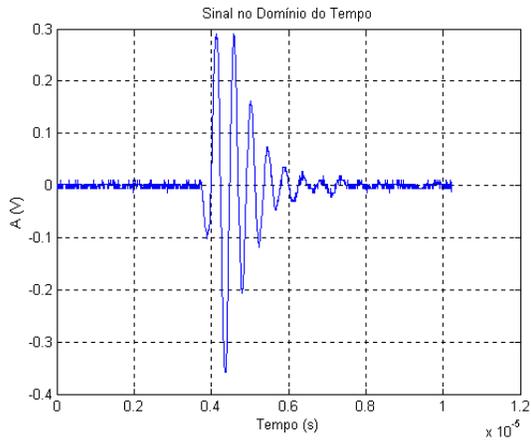
Epóxi e alumina			
<i>Transdutor</i>	<i>BW %</i>	<i>Fpico(MHz)</i>	<i>Fcentral(MHz)</i>
#16	51,02	2,14	1,99
#18	37,30	2,20	2,17
#19	43,16	2,13	2,10
#6	45,32	1,96	1,98
Epóxi, Alumina e Tungstênio			
Transdutor	BW %	Fpico(MHz)	Fcentral(MHz)
#4	47,43	2,04	2,00
#14	83,05	2,11	1,99
#15	45,29	1,95	1,92
#2	40,59	2,14	1,97
Epóxi e Tungstênio			
Transdutor	BW %	Fpico(MHz)	Fcentral(MHz)
#8	49,88	2,13	2,06
#10	42,54	2,08	2,00
#5	42,36	2,14	1,98



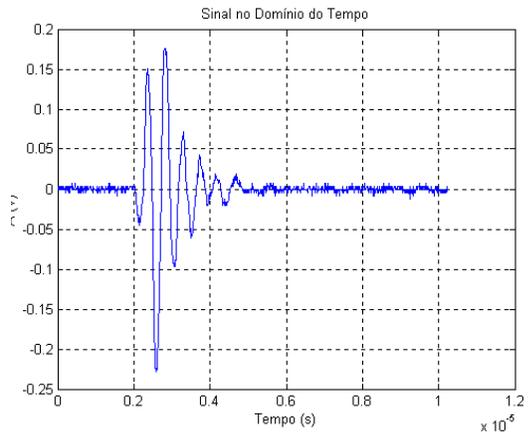
Transdutor # 6



Transdutor # 16

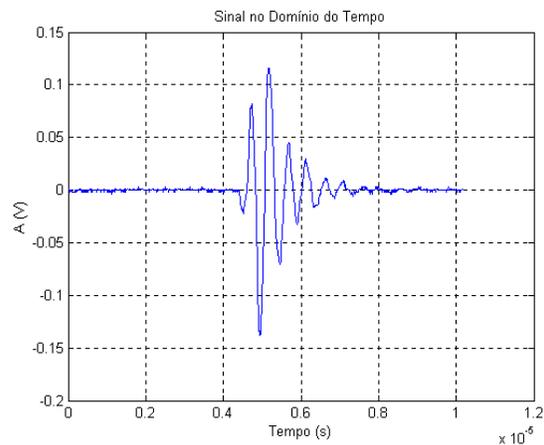


Transdutor # 18

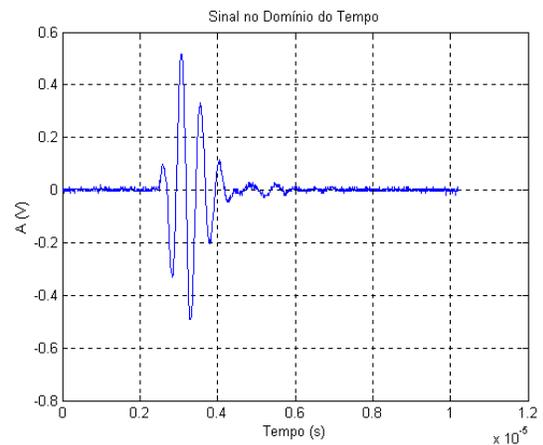


Transdutor # 19

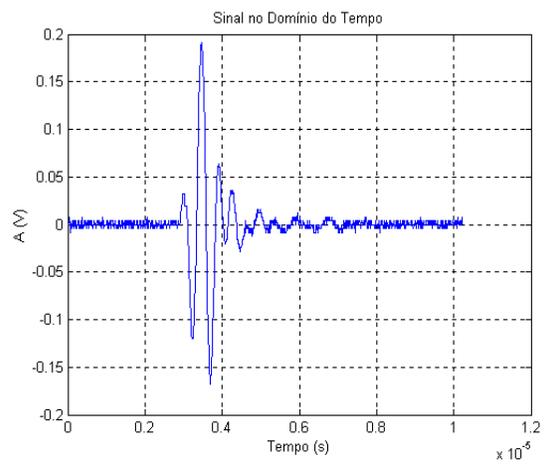
Figura IV.2. Pulsos acústicos gerados pelos transdutores construídos e captados por hidrofone pontual de PVDF. A camada de retaguarda destes transdutores é constituída de epóxi e pó de alumina.



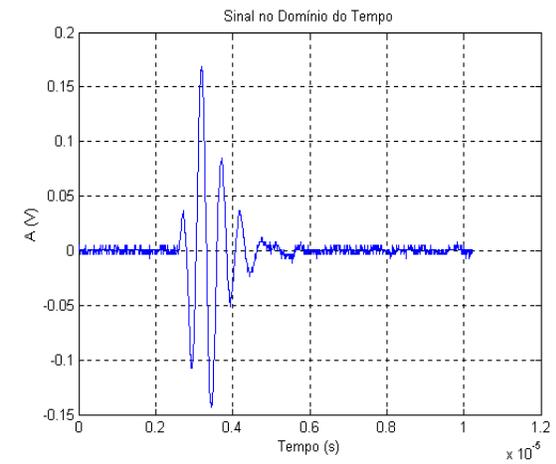
Transdutor #2



Transdutor #4

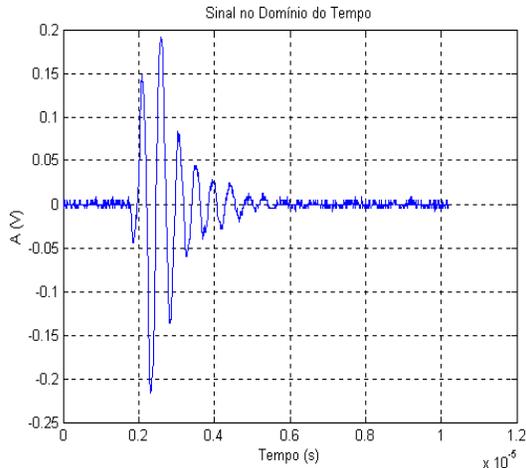


Transdutor #14

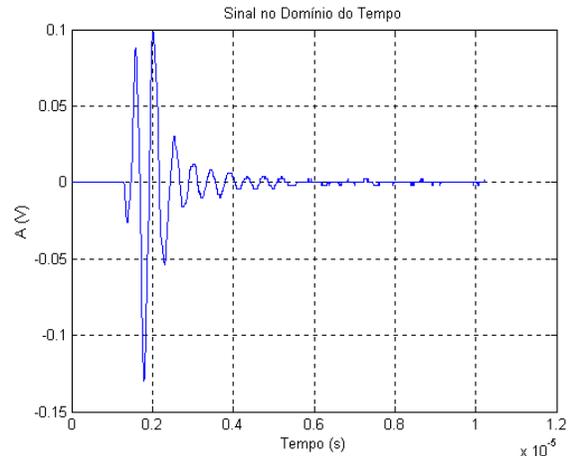


Transdutor #15

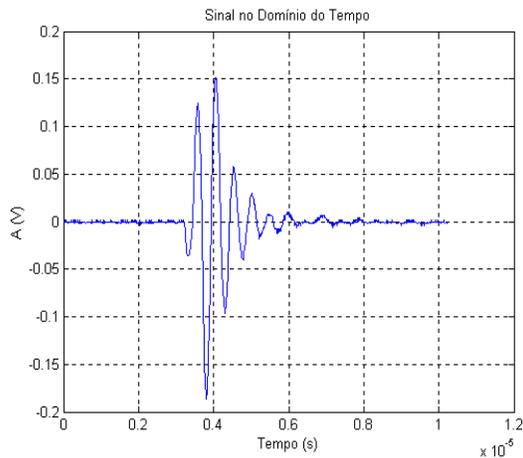
Figura IV.3. Pulsos acústicos gerados pelos transdutores construídos e captados por hidrofone pontual de PVDF. A camada de retaguarda destes transdutores é constituída de epóxi, pó de alumina e de pó de tungstênio.



Transdutor #5



Transdutor #8



Transdutor #10

Figura IV.4. Pulsos acústicos gerados pelos transdutores construídos e captados por hidrofone pontual de PVDF. A camada de retaguarda destes transdutores é constituída de epóxi e de pó de tungstênio.

Ecos (dos pulsos acústicos) gerados por refletor plano

A Tabela IV.7 apresenta os resultados dos parâmetros da resposta em frequência calculados para os transdutores construídos. Como indica a Norma ASTM E-1065, a resposta em frequência de um transdutor de ultra-som é determinada para o eco do pulso acústico gerado por refletor esférico ou plano. Um refletor plano colocado a 50mm da face do transdutor (ASTM E-1065) foi utilizado na obtenção da resposta em frequência dos

transdutores construídos, quando estes eram excitados por um pulso retangular negativo de amplitude 66V e 240ns de duração.

Tabela IV.7. Faixa de passagem dos transdutores sem indutor e com indutor; transdutores construídos com camada de acoplamento acústico com espessura de $3\lambda/4$ estão indicados em cinza.

<i>Epóxi e alumina</i>						
<i>Transdutor</i>	<i>BW %</i>	<i>Fpico(MHz)</i>	<i>Fcentral(MHz)</i>	<i>BW (indutor) %</i>	<i>Fpico(MHz)</i>	<i>Fcentral(MHz)</i>
#16	23,00	2,07	2,05	29,54	2,05	2,02
#18	19,96	2,18	2,20	21,12	2,16	2,17
#19	16,60	2,18	2,15	18,76	2,16	2,13
#6	24,41	2,12	2,08	26,13	2,11	2,06
<i>Epóxi, Alumina e Tungstênio</i>						
<i>Transdutor</i>	<i>BW %</i>	<i>Fpico(MHz)</i>	<i>Fcentral(MHz)</i>	<i>BW (indutor) %</i>	<i>Fpico(MHz)</i>	<i>Fcentral(MHz)</i>
#4	25,54	2,05	2,03	26,76	2,03	2,01
#14	33,49	2,18	2,20	34,45	2,23	2,18
#15	21,98	2,07	2,06	26,95	1,98	2,07
#2	15,74	2,14	2,11	18,35	2,09	2,08
<i>Epóxi e Tungstênio</i>						
<i>Transdutor</i>	<i>BW %</i>	<i>Fpico(MHz)</i>	<i>Fcentral(MHz)</i>	<i>BW (indutor) %</i>	<i>Fpico(MHz)</i>	<i>Fcentral(MHz)</i>
#8	23,74	2,24	2,14	25,97	2,18	2,14
#10	21,90	2,10	2,10	23,39	2,10	2,00
#5	17,75	2,16	2,11	19,03	2,13	2,10

Nos ensaios realizados com o refletor plano (Tabela IV.7) (sem indutor), temos que:

- o transdutor que apresentou maior largura de faixa foi o transdutor #14 (BW=33,49%); este foi construído com camada de retaguarda de epóxi, alumina e tungstênio e camada de acoplamento acústico com espessura $\lambda/4$;
- os transdutores construídos com camada de retaguarda composta de epóxi e alumina (#6 e #16) apresentaram uma faixa de passagem maior que 20% e os transdutores #18 e #19 apresentaram uma faixa de passagem menor que 20%;
- os transdutores construídos com camada de retaguarda composta de epóxi e pó de tungstênio (transdutores #8 e #10), apresentaram faixa de

passagem em torno de 22%, e o transdutor #5 apresentou uma faixa de passagem de 17,75%.

- Os transdutores construídos com camada de retaguarda composta de epóxi com tungstênio e epóxi com alumina e com espessura da camada de acoplamento $\lambda/4$, apresentaram maior BW que os transdutores construídos com os mesmos tipos de camada de retaguarda e com espessura de $3\lambda/4$.

Quando a largura da banda é calculada de acordo com a Norma ASTM E-1065, com o eco refletido por um alvo plano, seu valor é bem menor do que a largura da banda calculada para o pulso acústico gerado pelo transdutor construído. A faixa de passagem do pulso gerado é medida a partir do pulso captado pelo hidrofone pontual, que tem uma faixa de passagem bem mais ampla (1-20MHz) que a do transdutor construído (limitada pela espessura da camada de acoplamento acústico, $\lambda/4$). Além do que, a forma de onda do eco tem um comprimento maior que a do pulso gerado.

A faixa de passagem aumentou, após a colocação do indutor, entre 1% e 6%, como pode ser observado na Tabela IV.7, que mostra os valores da faixa de passagem em pulso/eco, obtida com refletor plano posicionado a 50mm da face do transdutor, para os transdutores sem indutor e com indutor.

A Figura IV.5 mostra os ecos gerados por um refletor plano a 50mm da face do transdutor, e os espectros de frequências deste sinal, de um mesmo transdutor sem e com acoplamento elétrico. A excitação do transdutor foi feita em ambos os casos com um pulso quadrado negativo de amplitude 66V; a frequência de excitação era ajustada de acordo com a frequência de ressonância do modo espessura de cada transdutor.

A amplitude do sinal apresentou um pequeno aumento em pulso/eco após a colocação do indutor, os transdutores construídos com camada de retaguarda composta de

epóxi e pó de tungstênio apresentaram uma amplitude do sinal maior que os demais transdutores.

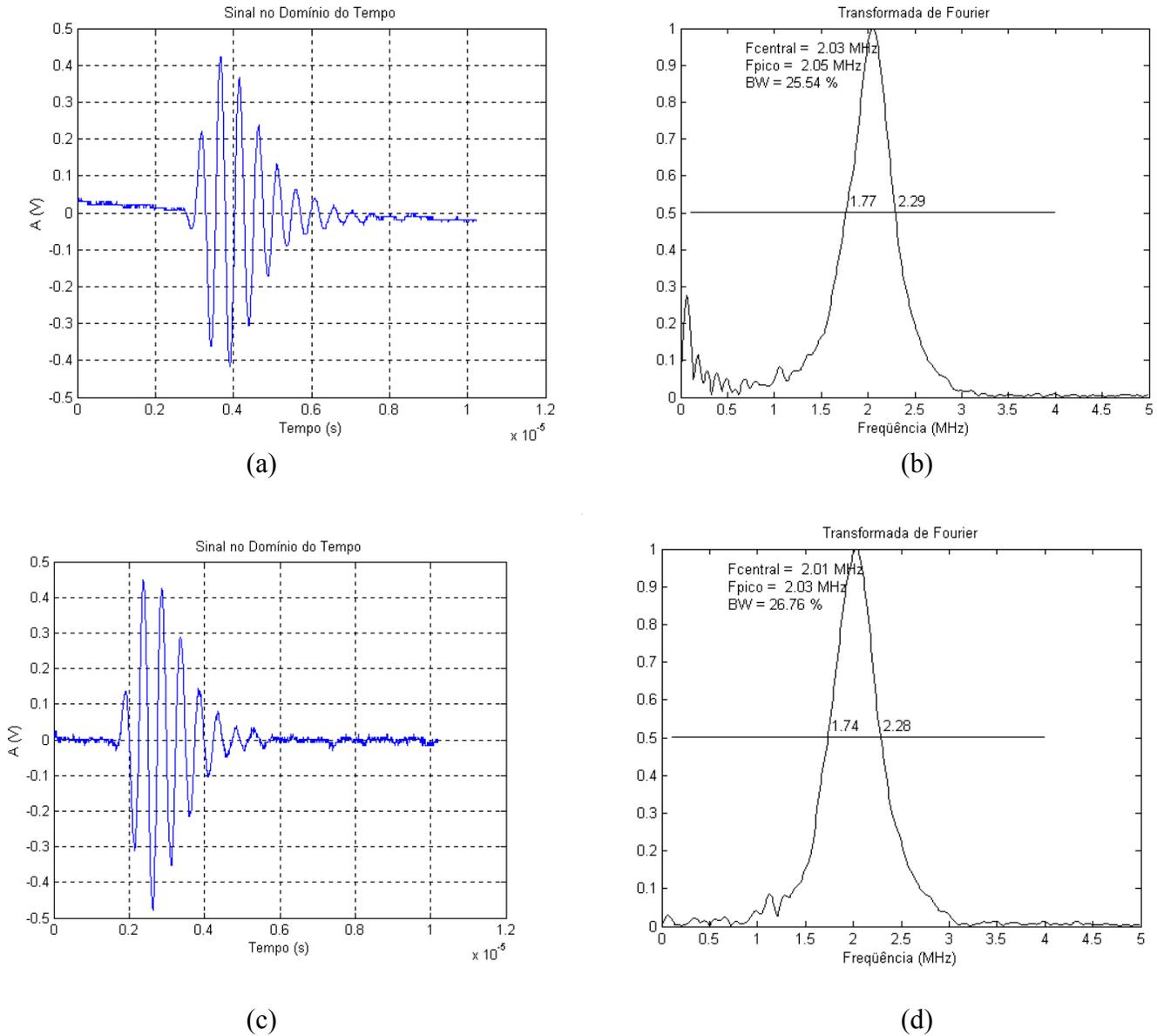


Figura IV.5. Resposta em pulso-eco do transdutor #4, mostrando o eco gerado por um refletor plano (a) do transdutor sem indutor; e (c) do transdutor com indutor; (b) e (d) espectro de freqüências, a largura de faixa, a freqüência central e a de amplitude máxima do sinal do transdutor sem e com indutor, respectivamente.

Os transdutores construídos com camada de acoplamento acústico com espessura $\lambda/4$ apresentaram uma amplitude do sinal maior que os construídos com espessura $3\lambda/4$. A alteração destes parâmetros pode ser observada no Apêndice B, que contém o perfil do pulso, e a resposta em frequência dos transdutores construídos; são apresentados os resultados antes e após a colocação do acoplamento elétrico.

IV.2.b. Parâmetros avaliados a partir da forma do pulso acústico gerado ou do eco recebido

IV.2.b.1. *Ringdown*

Na Tabela IV.8 são apresentados os valores de *ringdown* dos transdutores construídos, calculados pela Equação (3.10) apresentada no Capítulo III.

Os transdutores que apresentaram os menores valores de *ringdown* foram os transdutores #14 e #15 construídos com camada de retaguarda composta de epóxi com alumina e tungstênio, com acoplamento acústico de espessura $\lambda/4$. Os transdutores #2, #5 e #19, que apresentaram os maiores valores de *ringdown*, também foram os transdutores com as menores larguras de banda (Tabela IV.7). Como pode ser observado na Tabela IV.8, o valor de *ringdown* medido apresentou uma ligeira redução, após a colocação do indutor de acoplamento elétrico na maioria dos transdutores.

Tabela IV.8. Valores de *ringdown* medidos para cada transdutor sem indutor e com indutor; os transdutores construídos com camada de acoplamento acústico com espessura de $3\lambda/4$ estão indicados em cinza.

<i>Epóxi e alumina</i>		
<i>Transdutor</i>	<i>ringdown</i>	<i>ringdown(indutor)</i>
#16	5	4
#18	5	5
#19	6	6
#6	5	4
Epóxi, Alumina e Tungstênio		
Transdutor	Ringdown	Ringdown(indutor)
#4	5	c
#14	4	3
#15	4	3
#2	7	6
Epóxi e Tungstênio		
Transdutor	Ringdown	Ringdown(indutor)
#8	5	4
#10	5	5
#5	6	5

IV.2.b.2. Medida da sensibilidade relativa ou perdas por inserção (*Insertion Loss*)

As perdas por inserção para cada transdutor foram calculadas pela Equação (3.9), apresentada no Capítulo III. A Tabela IV.9 mostra que os valores calculados das perdas por inserção para cada transdutor construído, praticamente não apresentam variação com a compatibilização elétrica do transdutor. O transdutor foi excitado por um pulso quadrado negativo de amplitude de 66V, e duração 240ns, e o eco do sinal era proveniente de um refletor plano. Para o cálculo deste parâmetro foram utilizados o valor de pico do sinal de excitação do transdutor e os valores de pico do eco obtido para a determinação da resposta em frequência.

Tabela IV.9. Valor da perda por inserção (*IL*) para os transdutores construídos; os transdutores construídos com camada de acoplamento acústico com espessura de $3\lambda/4$ estão indicados em cinza.

<i>Epóxi e alumina</i>			Epóxi, Alumina e Tungstênio			Epóxi e Tungstênio		
<i>Transdutor</i>	<i>IL</i>	<i>IL(indutor)</i>	Transdutor	<i>IL</i>	<i>IL(indutor)</i>	Transdutor	<i>IL</i>	<i>IL(indutor)</i>
#16	-53,0	-52,3	#4	-43,9	-43,4	#8	-42,8	-44,3
#18	-48,9	-48,5	#14	-51,0	-50,4	#10	-49,1	-49,0
#19	-53,7	-53,5	#15	-49,8	-49,4	#5	-51,7	-51,0
#6	-44,9	-42,0	#2	-54,1	-55,2			

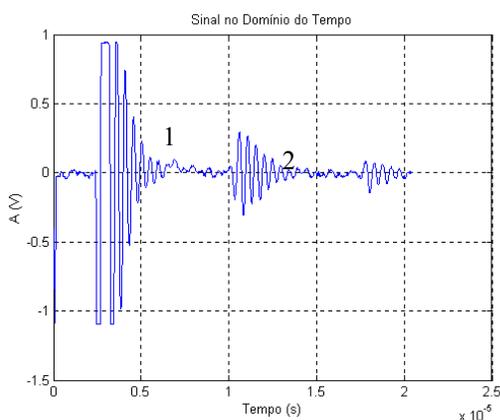
Observando os valores de *IL* dos transdutores com acoplamento elétrico, o menor valor (-42%) e o maior valor (-55,2%) resultaram para transdutores com camada de acoplamento acústico com $3\lambda/4$ de espessura. Dentro de cada grupo de transdutores, o valor de *IL* varia bastante. Não foi possível estabelecer uma dependência deste parâmetro com qualquer uma das variações da construção das camadas de retaguarda e de acoplamento acústico.

IV.2.b.3. Medida da resolução axial

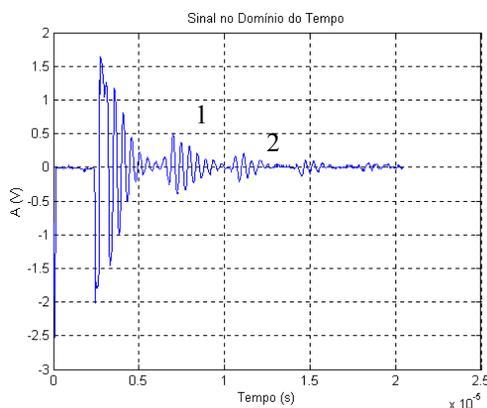
A resolução axial apresentada no Capítulo II (item 2.c) e no Capítulo III (item 2.b.6), consiste na distância mínima entre dois alvos localizados no eixo axial, cujos ecos captados pelo transdutor sejam distinguíveis. Para esta medida foram utilizadas chapas de acrílico de várias espessuras: 10mm, 6mm, 5mm, 3mm, 1.5mm e 1mm. A resolução axial dos transdutores foi avaliada observando-se na tela do osciloscópio os ecos provenientes das duas faces destes alvos (Figura IV.6) para determinar que espessura mínima poderia ser resolvida, isto é, que espessura gerava ecos (vindos de ambas as faces) que ainda podiam ser distinguidos. A mínima separação entre as faces dos alvos, cujos ecos puderam ser distinguidos foi 5mm para todos os transdutores construídos. Esta resolução é resultado do

pulso relativamente longo gerado pelos transdutores e da faixa de passagem estreita dos transdutores.

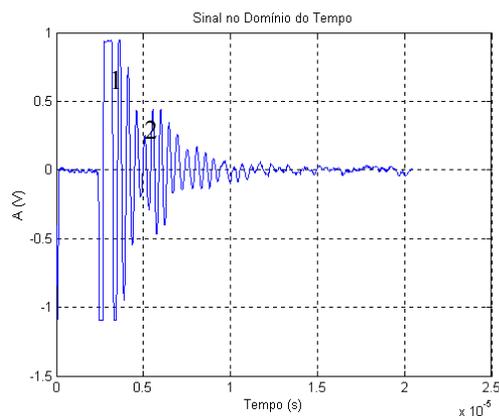
Disponha-se de um *phantom* adequado para realização da avaliação de resoluções axial e transversal dos transdutores. No entanto, tal *phantom* é adequado para testar transdutores de imagem do tipo *arrays*, com lobo central reduzido, pulso estreito e faixa de passagem larga. Um protocolo da caracterização de transdutor deve prever as medidas de resoluções lateral e axial, com *phantom*. O modo, apresentado neste item, de avaliar a resolução axial foi utilizado, mas não foi possível avaliar a resolução transversal ou lateral dos transdutores construídos.



(a)



(b)



(c)

1 = pulso de excitação + eco da primeira face da placa

2 = pulso de excitação + eco da segunda face da placa

Figura IV.6. Ecos obtidos para avaliação de resolução axial. Alvos: placa de acrílico com 10mm de espessura (a); 5mm de espessura (b); e 3mm de espessura (c), para a qual os ecos começam a se sobrepor e não são mais claramente distinguidos.

IV.2.c. Parâmetros avaliados a partir do mapeamento do campo acústico

IV.2.c.1. Área ativa

A área ativa dos transdutores é obtida a partir do mapeamento do campo acústico no plano XZ, a 1,5mm de distância da face do transdutor, numa área de 30mm por 30mm, de acordo com o procedimento descrito no Capítulo III.

O valor de área ativa medido para os transdutores construídos ficou entre 8,45mm e 9,45mm, com exceção do transdutor #4, cuja área ativa é de 14,65mm, como pode ser observado na Tabela IV.10 e nas figuras do mapeamento do campo acústico no plano XZ do Apêndice C. Pode-se notar que a variação da área ativa foi pequena (Tabela IV.10), independentemente da composição da camada de retaguarda e da espessura da camada de acoplamento acústico.

Tabela IV.10. Valor da área ativa medida para os transdutores construídos; os transdutores construídos com camada de acoplamento acústico com espessura de $3\lambda/4$ estão indicados em cinza.

<i>Epóxi e alumina</i>		Epóxi, Alumina e Tungstênio		Epóxi e Tungstênio	
<i>Transdutor</i>	<i>Área Ativa</i>	Transdutor	Área Ativa	Transdutor	Área Ativa
#16	8,65	#4	14,65	#8	9,00
#18	8,78	#14	8,90	#10	8,95
#19	9,10	#15	8,85	#5	8,45
#6	9,45	#2	9,11		

IV.2.c.2. Perfil transversal do campo acústico

Nas Figuras IV.7 a IV.9 são apresentados os perfis transversos dos transdutores construídos; na Tabela IV.11 são apresentados alguns parâmetros medidos a partir destes

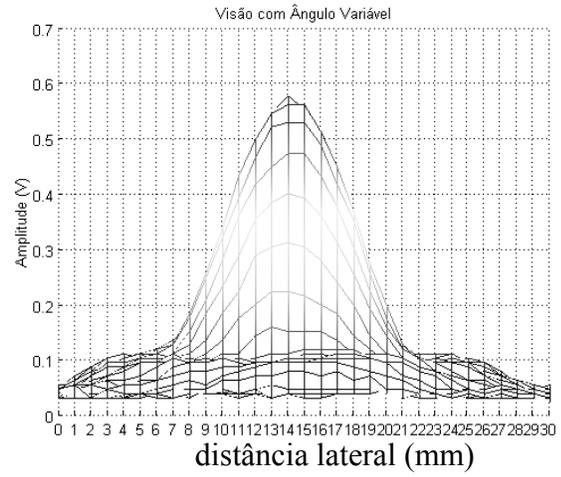
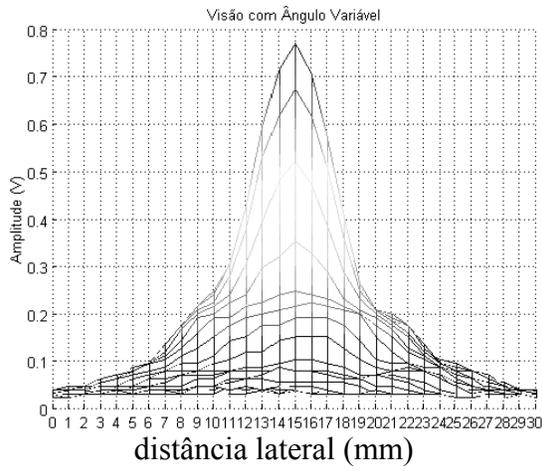
perfis, que fazem parte dos mapeamentos do campo acústico no plano XZ, que são mostrados no Apêndice C.

A partir das Figuras IV.7 a IV.10 e da Tabela IV.11, temos que:

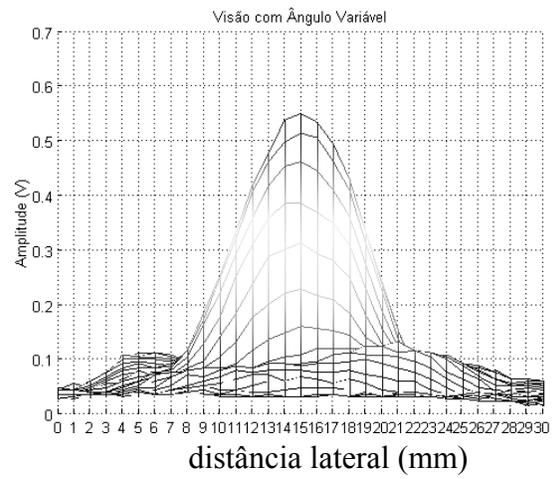
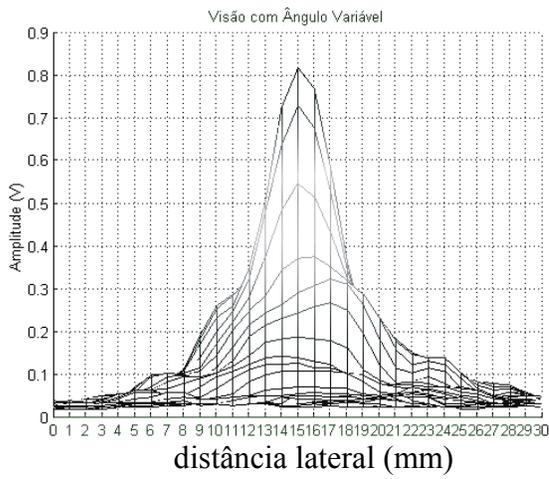
- a amplitude máxima do campo foi obtida na distância z_n , para todos os transdutores construídos;
- os transdutores construídos apresentaram valores bastante variados de amplitude na distância de separação entre o campo próximo e o campo distante; o transdutor #19 apresentou o maior valor de amplitude máxima: 1,46V, e o menor valor de amplitude máxima foi medido para o transdutor #18: 0,61V, ambos com camada de retaguarda de epóxi e alumina e espessura $\lambda/4$ da camada de acoplamento;
- não pode ser observada influência da espessura da camada de acoplamento nem do tipo de camada de retaguarda no perfil transversal dos transdutores.

Tabela IV.11. Valor da intensidade relativa do perfil transversal do campo acústico dos transdutores construídos medida a cinco distâncias da face do transdutor; os transdutores construídos com camada de acoplamento acústico com espessura de $3\lambda/4$ estão indicados em cinza.

<i>Epóxi e alumina</i>						
<i>Intensidade do perfil transversal (V)</i>						
<i>Transdutor</i>	$z_n/3$	$z_n/2$	z_n	$2 z_n$	$3 z_n$	$4 z_n$
#16	0,65	0,68	0,81	0,54	0,39	0,29
#18	0,5	0,57	0,78	0,57	0,44	0,34
#19	0,71	0,8	0,93	0,69	0,48	0,36
#6	0,6	0,59	0,77	0,58	0,41	0,32
Epóxi, Alumina e Tungstênio						
Intensidade do perfil transversal (V)						
Transdutor	$z_n/3$	$z_n/2$	z_n	$2 z_n$	$3 z_n$	$4 z_n$
#4	0,8	0,85	1	0,74	0,51	0,44
#14	0,58	0,61	0,7	0,48	0,35	0,27
#15	0,9	0,8	1,1	0,8	0,58	0,45
#2	0,51	0,51	0,7	0,51	0,36	0,28
Epóxi e Tungstênio						
Intensidade do perfil transversal (V)						
Transdutor	$z_n/3$	$z_n/2$	z_n	$2 z_n$	$3 z_n$	$4 z_n$
#8	0,7	0,72	1	0,69	0,47	0,36
#10	0,72	0,75	1	0,69	0,48	0,38
#5	0,79	0,9	1	0,70	0,48	0,37

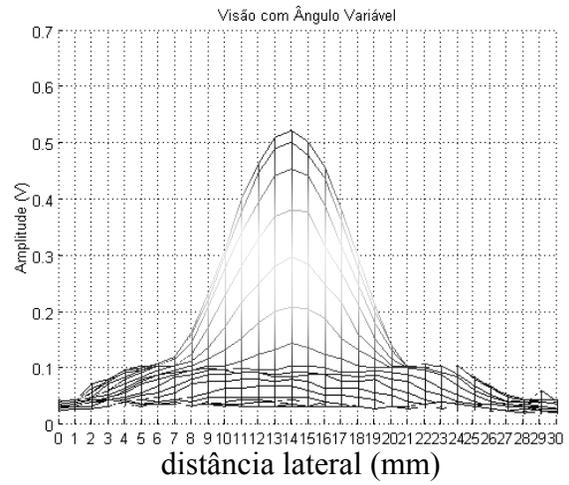
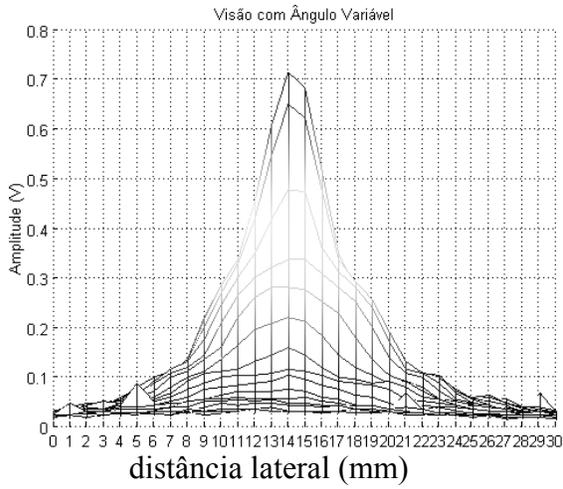


Transdutor #6

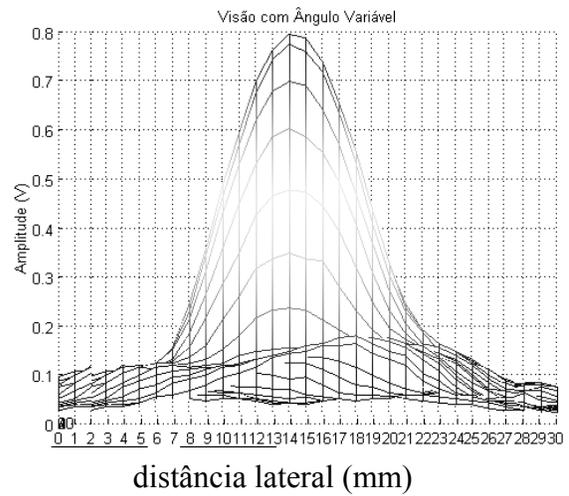
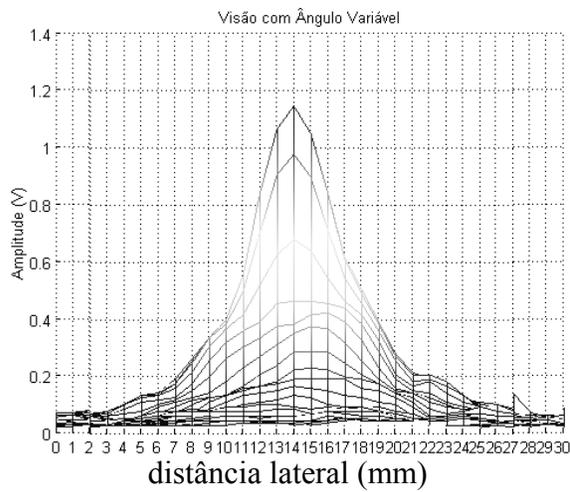


Transdutor #16

Figura IV.7. Perfil transverso do campo acústico gerado pelos transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de alumina, medido em duas distâncias z_n (esquerda) e $2z_n$ (direita).

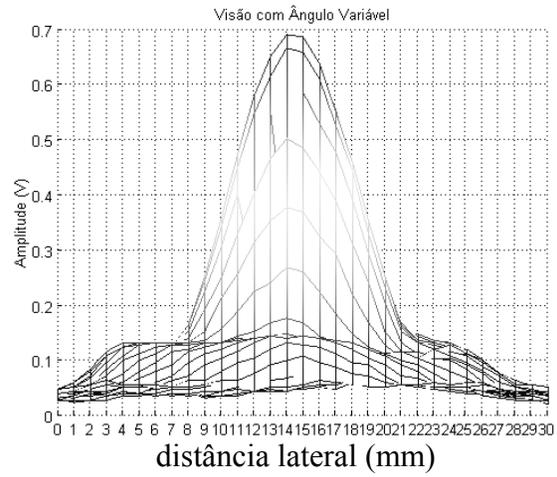
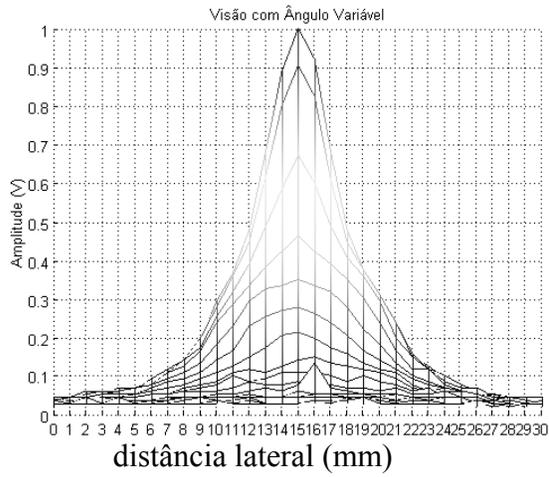


Transdutor #2

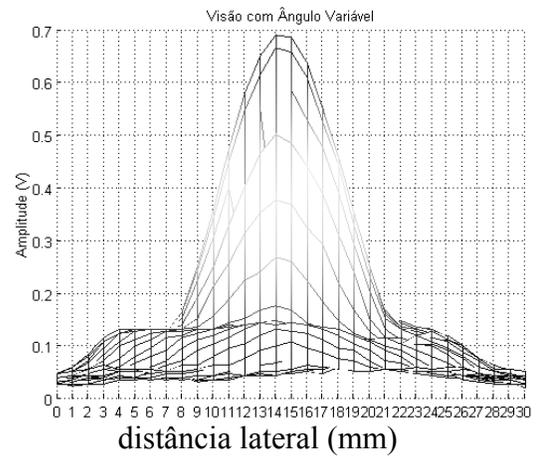
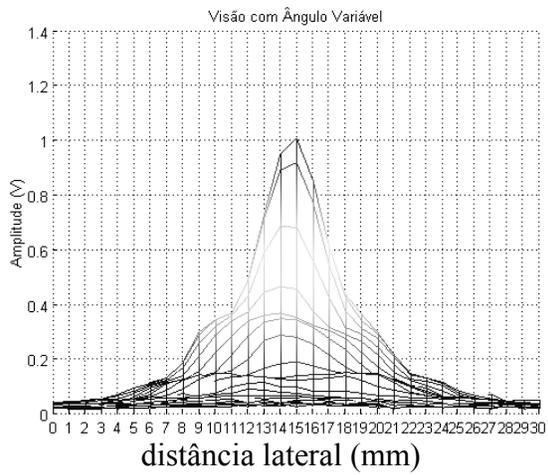


Transdutor #15

Figura IV.9. Perfil transverso dos transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi, pó de alumina e pó de tungstênio, medido em duas distâncias, z_n (esquerda) e $2z_n$ (direita).



Transdutor #8



Transdutor #10

Figura IV.10. Perfil transverso dos transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de tungstênio, medido em duas distâncias, z_n (esquerda) e $2z_n$ (direita).

IV.2.c.3. Perfil axial do campo acústico

O perfil axial dos transdutores pode ser obtido a partir do mapeamento do campo acústico no plano XY. Os mapeamentos do campo acústico no plano XY, de cada um dos transdutores construídos estão reunidos no Apêndice D. Os perfis axiais dos transdutores podem ser observados nas Figuras IV.11 a IV.13.

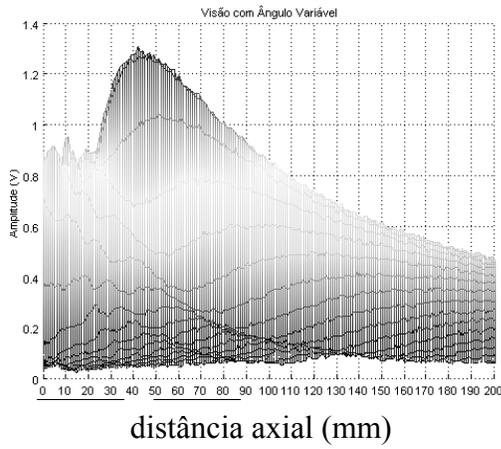
A partir da representação 2D do mapeamento no plano XY do campo acústico gerado por cada transdutor é possível determinar os contornos de intensidade de campo de -3dB , -6dB e -20dB em relação à intensidade máxima medida (Figuras IV.14 a IV.16).

Na Tabela IV.12 são apresentados os valores da intensidade máxima do perfil axial do campo acústico, a profundidade e a largura máxima da linha de contorno de -3dB dos campos acústicos gerados pelos transdutores construídos. Temos que:

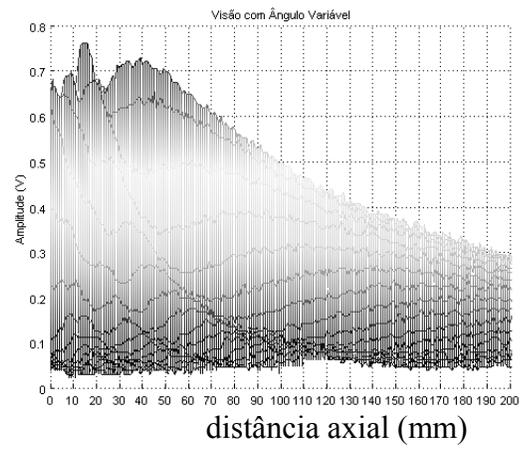
- o grupo de transdutores que apresentou valores de profundidade de campo mais próximos entre si, foi o de transdutores construídos com camada de retaguarda composta de epóxi, alumina e tungstênio, seguido pelo grupo de transdutores construídos com camada de retaguarda composta de epóxi e alumina;

- quanto à espessura da camada de acoplamento, dentre os transdutores construídos com camada de acoplamento de espessura $3\lambda/4$, o transdutor com camada de retaguarda de epóxi e tungstênio (#5), apresentou uma profundidade de campo menor, e o decaimento mais acentuado de intensidade de campo;

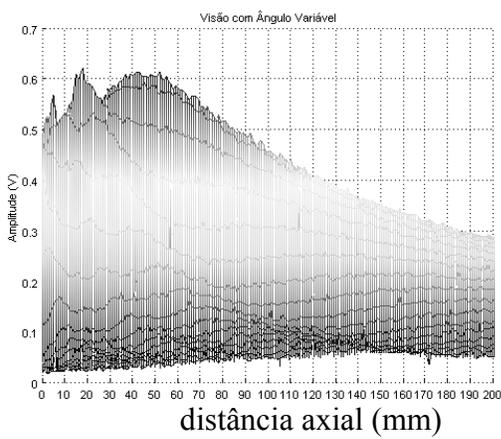
- o transdutor #18 (retaguarda de epóxi e alumina) apresentou a menor intensidade e a maior profundidade de campo, indicando um decaimento suave da intensidade do campo acústico, e também a maior largura do contorno de campo de -3dB ;



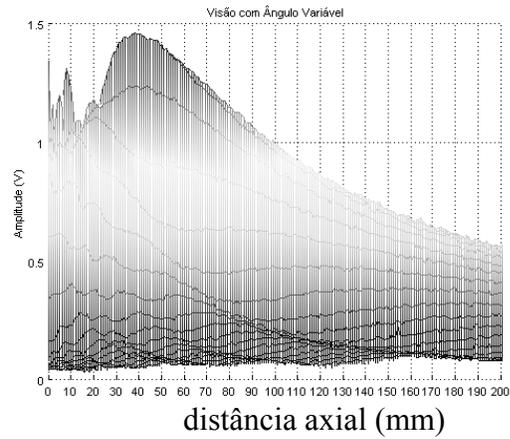
Transdutor #6



Transdutor #16

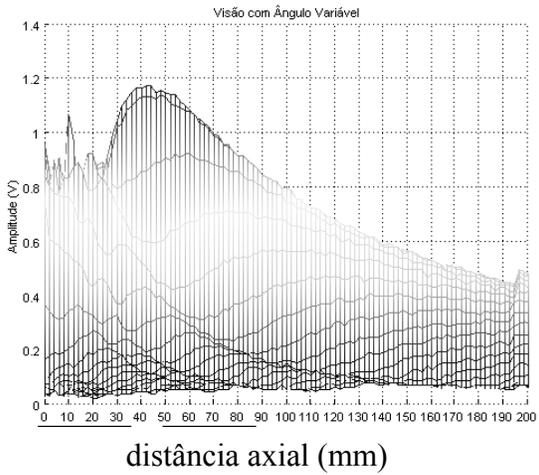


Transdutor #18

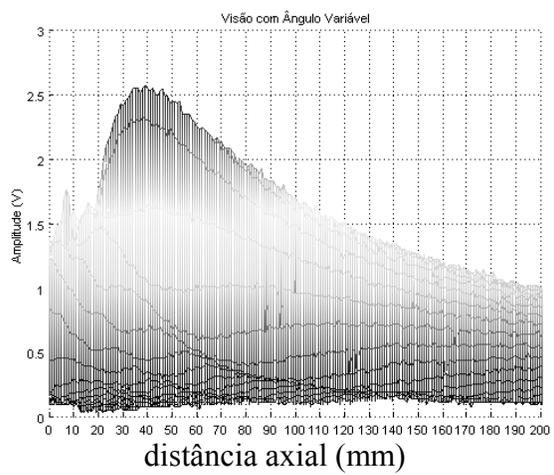


Transdutor #19

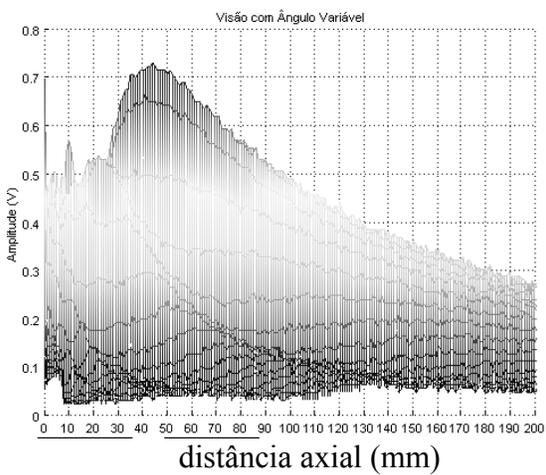
Figura IV.11. Perfil axial dos campos acústicos gerados por transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de alumina.



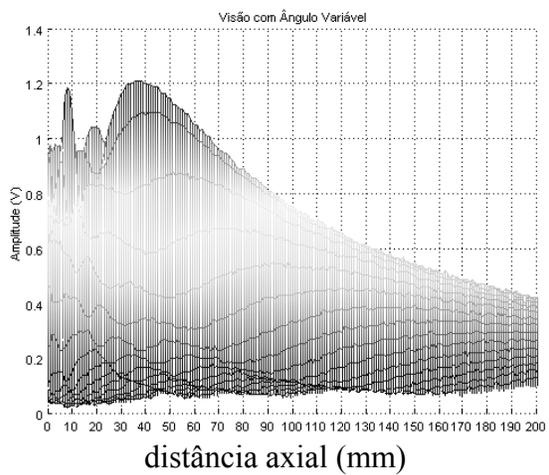
Transdutor #2



Transdutor #4

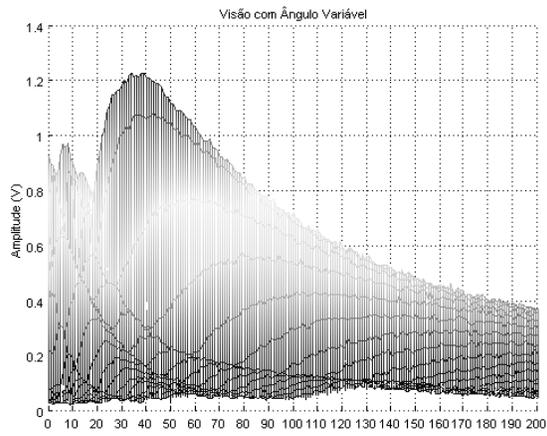


Transdutor #14



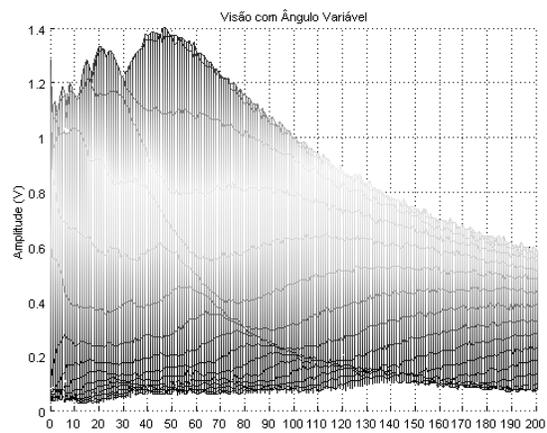
Transdutor #15

Figura IV.12. Perfil axial dos campos acústicos gerados por transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi, pó de alumina e pó de tungstênio.



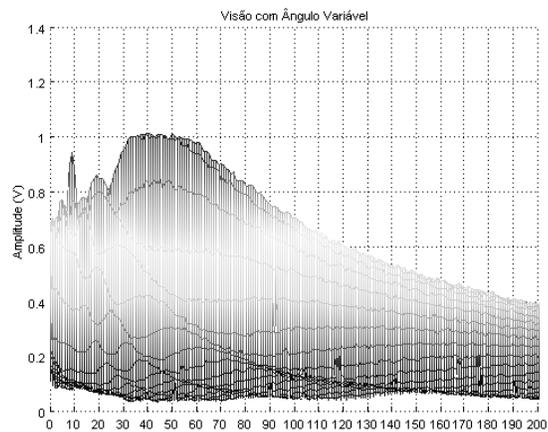
distância axial (mm)

Transdutor #5



distância axial (mm)

Transdutor #8



distância axial (mm)

Transdutor #10

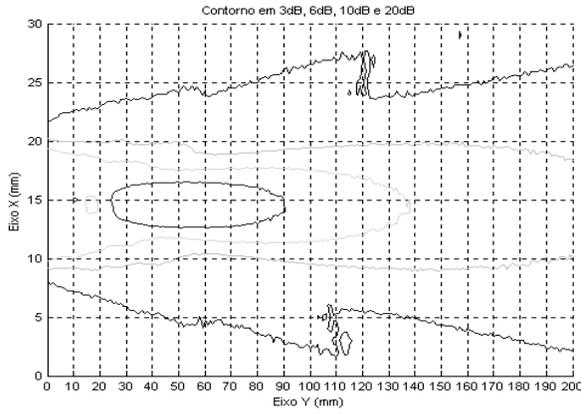
Figura IV.13. Perfil axial dos campos acústicos gerados por transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de tungstênio.

- o transdutor #19 (retaguarda de epóxi e alumina) apresentou decaimento acentuado da intensidade do campo, semelhante à do transdutor #5 (retaguarda de epóxi e tungstênio).

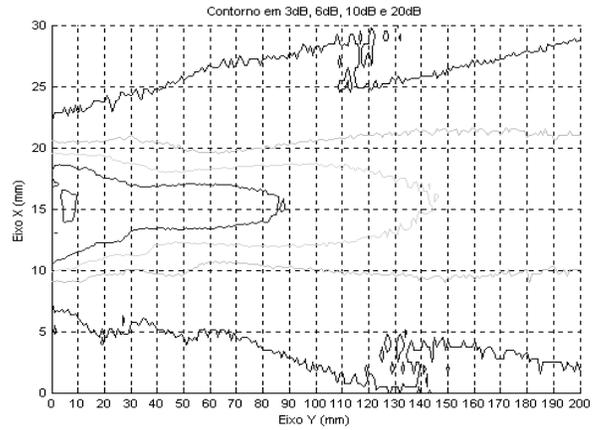
O efeito da colocação do indutor de compatibilização elétrica provocou, em alguns transdutores, uma atenuação na intensidade do campo, quando traçado o perfil axial, como pode ser observado na Figura IV.17. A profundidade do contorno de -3dB não foi afetada pela colocação do indutor nos transdutores.

Tabela IV.12. Valores da amplitude máxima do perfil axial do campo acústico, da profundidade e da largura da linha de contorno de -3dB; os transdutores construídos com camada de acoplamento de espessura $3\lambda/4$ estão indicados em cinza.

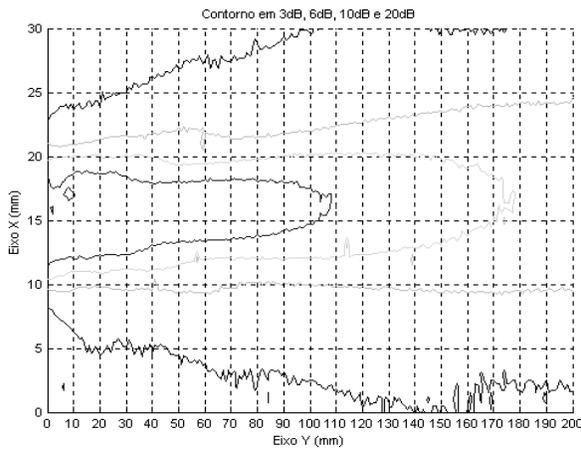
<i>Epóxi e pó de Alumina</i>			
<i>Transdutor</i>	<i>Amplitude Máxima (V)</i>	<i>Profundidade (mm) do contorno de -3dB</i>	<i>Largura (mm) do contorno de -3dB</i>
#16	0,76	88	3,5
#18	0,61	108	4,6
#19	1,46	94	4,0
#6	1,30	90	3,9
<i>Epóxi, pó de Alumina e pó de Tungstênio</i>			
<i>Transdutor</i>	<i>Amp. Max. (V)</i>	<i>Profundidade(mm) cont. 3db</i>	<i>Largura x (mm) cont. de 3dB</i>
#4	1,25	91	3,5
#14	0,73	93	3,8
#15	1,21	84	4,2
#2	1,22	90	4,0
<i>Epóxi e pó de Tungstênio</i>			
<i>Transdutor</i>	<i>Amp. Max. (V)</i>	<i>Profundidade(mm) cont. 3db</i>	<i>Largura x (mm) cont. de 3dB</i>
#8	1,40	102	3,8
#10	1,01	98	4,1
#5	1,22	76	3,2



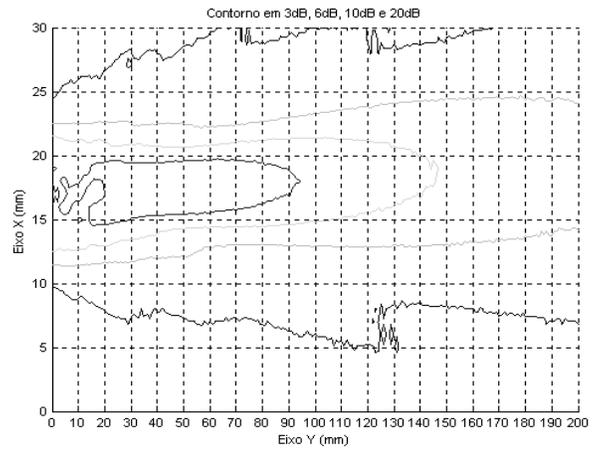
Transdutor #6



Transdutor #16

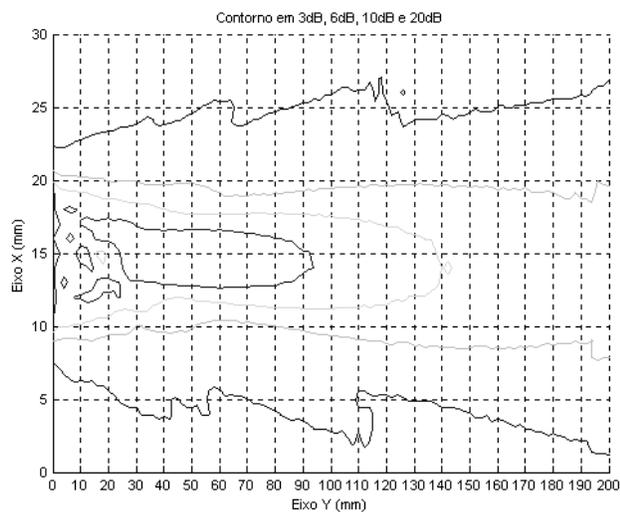


Transdutor #18

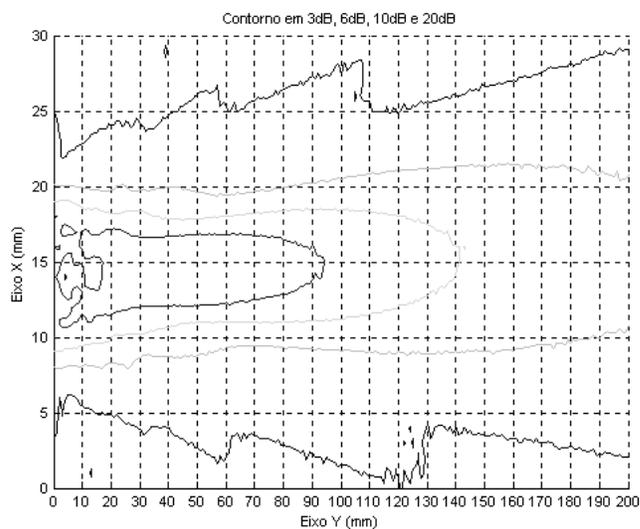


Transdutor #19

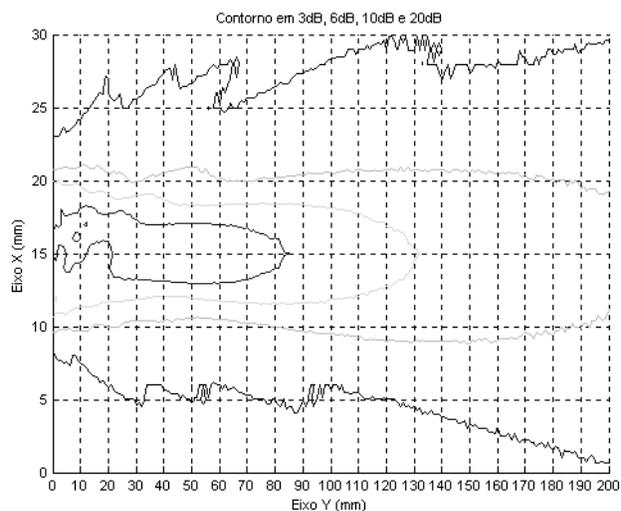
Figura IV.14. Representação 2D do mapeamento do campo acústico no plano XY dos transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de alumina, os contornos da intensidade do campo são de -3dB , -6dB , -10dB e -20dB , e são mostrados na figura de dentro para fora, nesta ordem.



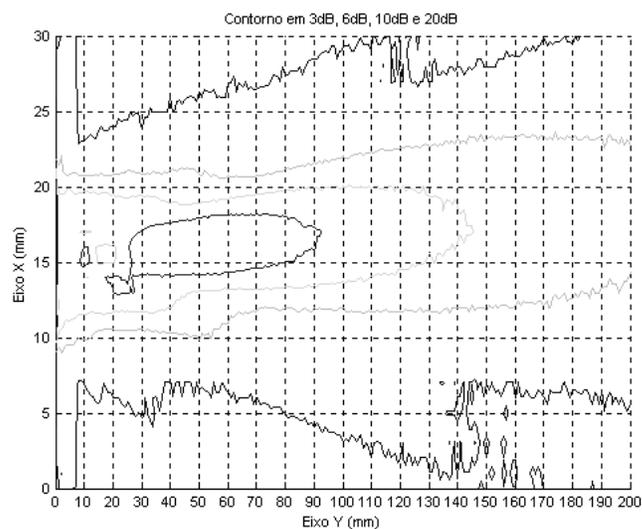
Transdutor #2



Transdutor #4

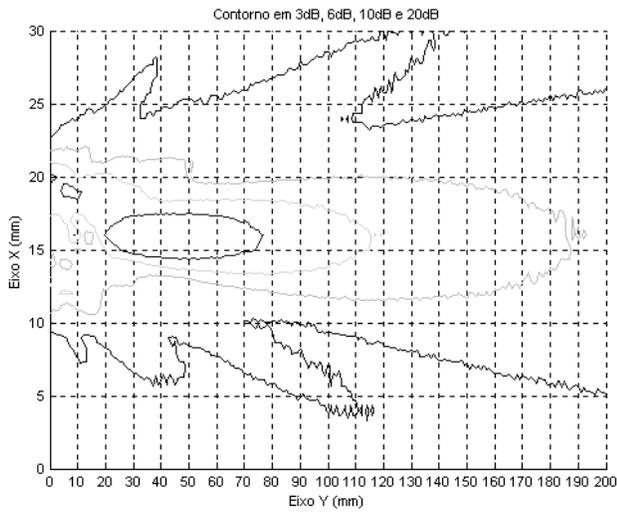


Transdutor #14

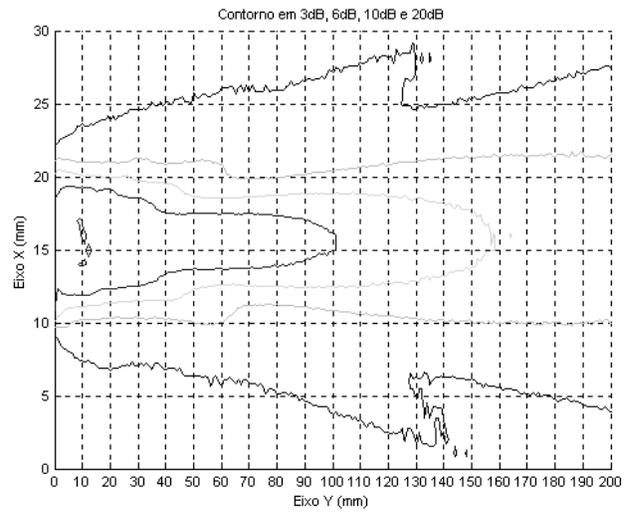


Transdutor #15

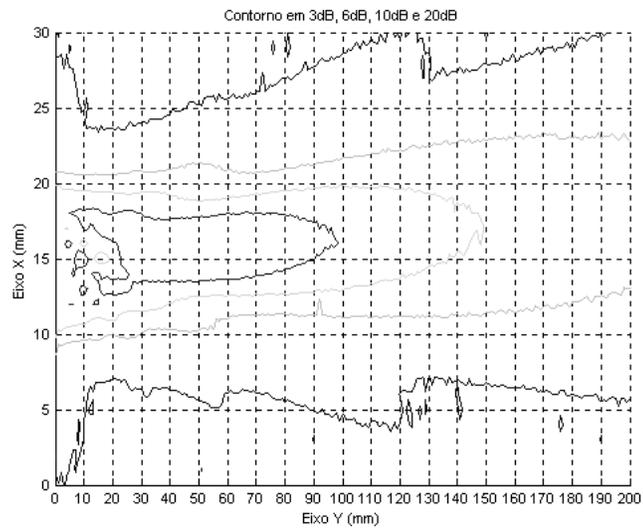
Figura IV.15. Representação 2D do mapeamento do campo acústico no plano XY dos transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi, pó de alumina e pó de tungstênio, os contornos da intensidade do campo são de -3dB , -6dB , -10dB e -20dB , e são mostrados na figura de dentro para fora, nesta ordem.



Transdutor #5



Transdutor #8



Transdutor #10

Figura IV.16. Representação 2D do mapeamento do campo acústico no plano XY dos transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de tungstênio, os contornos da intensidade do campo são de -3dB , -6dB , -10dB e -20dB , e são mostrados na figura de dentro para fora, nesta ordem.

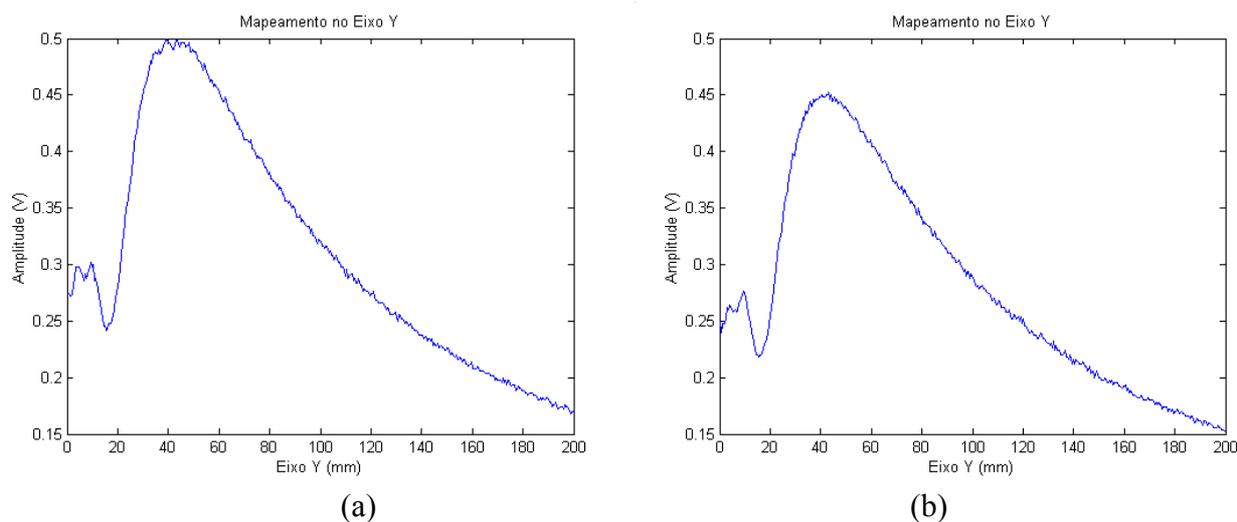


Figura IV.17. Perfil Axial do transdutor #2 (a) sem indutor e (b) com indutor.

IV.2.c.4. Espalhamento do feixe

Os resultados do cálculo do espalhamento do feixe acústico gerado por cada um dos transdutores construídos, pela Equação (3.12), estão colocados na Tabela IV.13.

Os transdutores que apresentaram maior espalhamento do feixe, foram os transdutores construídos com camada de retaguarda constituída de epóxi, alumina e tungstênio, e para essa constituição da camada de retaguarda não pode ser observada nenhuma influência da espessura da camada de acoplamento. Os transdutores construídos com camada de retaguarda composta de epóxi e tungstênio apresentaram menor espalhamento do feixe sendo que os transdutores construídos com espessura da camada de acoplamento de $3\lambda/4$ apresentaram menor espalhamento de campo que os demais transdutores construídos com camada de acoplamento com espessura de $\lambda/4$. O transdutor que apresentou espalhamento de feixe maior foi o transdutor #15, que foi construído com camada de retaguarda composta de epóxi e pós de alumina e tungstênio; o transdutor que apresentou menor espalhamento de feixe foi o transdutor #5 (camada de retaguarda composta de epóxi e pó de tungstênio). Nestes transdutores não se

identificou influência da espessura da camada de acoplamento acústico no espalhamento do feixe.

Tabela IV.13. Espalhamento do feixe (2ψ) para cada transdutor.

<i>Epóxi e alumina</i>				
<i>Transdutor</i>	<i>4z_n(mm)</i>	<i>z_a (mm)</i>	<i>W(mm)</i>	<i>2ψ</i>
#16	189	47	1,54	0,0217
#18	187	47	0,65	0,0093
#19	204	51	1,50	0,0196
#6	192	48	1,43	0,0199
Epóxi, Alumina e Tungstênio				
Transdutor	4z_n(mm)	z_a (mm)	W(mm)	2ψ
#4	201	43	1,00	0,0127
#14	205	51	1,40	0,0182
#15	190	47	1,60	0,0224
#2	195	48	1,30	0,0177
Epóxi e Tungstênio				
Transdutor	4z_n(mm)	z_a(mm)	W(mm)	2ψ
#8	205	51	1,20	0,0156
#10	193	48	0,80	0,011
#5	190	47	0,28	0,0039

V. Conclusão e Discussão

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um protocolo para construção e caracterização de transdutores ultra-sônicos com cerâmicas piezoelétricas, onde cada fase de construção fosse bem documentada, para posterior reprodução dos procedimentos. Após a construção dos transdutores foram realizados testes para avaliação do desempenho dos mesmos. Os testes foram realizados em pulso-eco e em transmissão/recepção, segundo procedimentos indicados em normas.

A documentação de cada uma das etapas de construção, descritas no Capítulo III, foi feita pela obtenção das curvas de módulo e fase da impedância *versus* frequência, para cada transdutor; através destas curvas pode-se determinar e conferir os modos de vibração, e também detectar eventuais problemas na construção dos transdutores de ultra-som.

A construção adequada da camada de retaguarda é importante para que o pulso acústico gerado não apresente muitos ciclos, e para isto deve absorver a vibração da cerâmica rapidamente.

Dois dos três transdutores construídos com camada de retaguarda composta de epóxi, pó de alumina e pó de tungstênio apresentaram *ringdown* menor (3), e um destes (#14) apresentou a maior faixa de passagem de todos os demais transdutores.

A construção adequada da camada de compatibilização acústica é decisiva para que a energia acústica disponível seja transmitida, de maneira eficiente, da face frontal da cerâmica para o meio de transmissão, em vez de ser refletida e absorvida pela camada de retaguarda, diminuindo perdas e possibilitando uma pressão acústica final maior. Os transdutores foram construídos supondo sua utilização com tecidos biológicos, ou em meios cuja impedância acústica seja semelhante à da água.

Quanto à camada de compatibilização acústica, os transdutores construídos com a espessura da camada de acoplamento acústico $\lambda/4$, comparados aos transdutores construídos com espessura $3\lambda/4$, apresentaram perdas por inserção menores (como era esperado, pois quanto maior a espessura desta camada, maior atenuação sofre o sinal); e também apresentaram larguras de faixa maiores; com exceção dos transdutores com camada de retaguarda composta de epóxi e alumina.

Os transdutores construídos com camada de retaguarda composta de epóxi e pó de tungstênio apresentaram uma variabilidade de resultados mais facilmente identificáveis com a espessura da camada de compatibilização acústica: profundidade e largura do contorno do campo de intensidade -3dB menores, espalhamento e área ativa de campo menores, para o transdutor com espessura $\lambda/4$, comparado aos resultados dos construídos com espessura $3\lambda/4$ da camada de compatibilização acústica.

O procedimento de testes adotado mostrou-se adequado, pois permitiu observar o desempenho dos transdutores, tanto como geradores quanto como receptores de sinais acústicos, o comportamento do campo nas três direções ortogonais X, Y e Z, e características da resposta em frequência, como a largura de faixa de passagem dos transdutores. Os valores obtidos das perdas por inserção ou sensibilidade relativa para os transdutores estão dentro do esperado e de acordo com Alves, Ritter e Shung (2000).

A colocação do indutor, para a realização da compatibilização elétrica dos transdutores, permitiu ajustar as curvas de módulo e fase da impedância em função da frequência: redução do módulo da impedância na frequência de ressonância e aumento da impedância na anti-ressonância, além do cruzamento da fase por zero nestas frequências.

A colocação do indutor não alterou as características do campo acústico gerado pelos transdutores construídos. Não foram observadas diferenças nos valores de profundidade e de largura dos contornos de intensidade de -3dB dos campos acústicos mapeados, apenas uma pequena atenuação na intensidade máxima de campo, medida na distância de separação das regiões de campos próximo e distante.

No entanto, após a compatibilização elétrica, os parâmetros medidos a partir do eco refletido por um alvo plano, tais como largura de banda que aumentou e *ringdown* que diminuiu, indicaram uma melhora no desempenho final dos transdutores.

A realização de cada etapa de construção dos transdutores, definidas neste trabalho, envolveu o uso de materiais e equipamentos simples, e procedimentos manuais delicados sem muita complexidade. A execução cuidadosa de cada etapa, acompanhada pela obtenção das curvas de módulo e fase de impedância do transdutor em função da frequência, foi um fator decisivo no desempenho final do transdutor. Mesmo assim, transdutores construídos no mesmo lote (mesma composição de camada de retaguarda e espessura de camada de acoplamento acústico) não apresentaram características de desempenho idênticas. A construção dos transdutores envolve um fator de erro que não foi avaliado devido ao número baixo de amostras obtidas. Foram construídos 18 transdutores (3 tipos de camada de retaguarda e 2 espessuras de camada de acoplamento acústico) e apenas 11 foram efetivamente usados, devido principalmente a problemas de perda de contato elétrico do cabo coaxial com a cerâmica.

Antes da realização deste trabalho, a caracterização de transdutores no LUS era realizada sem a observação completa das normas em vigência. Uma contribuição deste trabalho foi a descrição, feita no Capítulo III, dos procedimentos de medidas do desempenho dos transdutores de ultra-som, segundo as diversas normas existentes que

foram consultadas, em especial a ASTM E-1065. Com os procedimentos descritos, buscou-se estabelecer um protocolo de caracterização de transdutores de ultra-som.

Na Tabela V.1 estão resumidos os resultados da caracterização dos transdutores construídos.

Algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros, que complementarão os resultados descritos nesta dissertação, são:

- Construir transdutores com a camada de retaguarda com formatos diferentes além de impedâncias acústicas distintas.
- Construir transdutores com lentes focalizadoras de campo acústico.
- Construir transdutores fazendo a compatibilização acústica entre as impedâncias acústicas da cerâmica e a de um meio de transmissão específico.
- Desenvolver técnicas de construção de transdutores com faixa de passagem larga.

Na tabela a seguir estão resumidos os resultados da caracterização dos transdutores construídos.

Tabela V.1. Resultados da caracterização dos transdutores construídos.

Transdutor	k	BW %	Ringdown	IL	Área ativa	Intensidade em z_n (V)	Amplitude Máxima (V)	Profundidade (mm) do contorno de -3dB	Largura (mm) do contorno de -3dB	$2\psi (10^{-3})$
#6	<i>0,574</i>	<i>26,13</i>	<i>4</i>	<i>-42,0</i>	<i>9,45</i>	<i>0,77</i>	<i>1,3</i>	<i>90</i>	<i>3,9</i>	<i>19,9</i>
#16	<i>0,601</i>	<i>29,54</i>	<i>4</i>	<i>-52,3</i>	<i>8,65</i>	<i>0,81</i>	<i>0,76</i>	<i>88</i>	<i>3,5</i>	<i>21,7</i>
#18	<i>0,466</i>	<i>21,12</i>	<i>5</i>	<i>-48,5</i>	<i>8,78</i>	<i>0,78</i>	<i>0,61</i>	<i>108</i>	<i>4,6</i>	<i>9,3</i>
#19	<i>0,667</i>	<i>18,76</i>	<i>6</i>	<i>-53,5</i>	<i>9,10</i>	<i>0,93</i>	<i>1,46</i>	<i>94</i>	<i>4</i>	<i>19,6</i>
#2	<i>0,684</i>	<i>18,35</i>	<i>6</i>	<i>-55,2</i>	<i>9,11</i>	<i>0,70</i>	<i>1,22</i>	<i>90</i>	<i>4</i>	<i>17,7</i>
#4	<i>0,607</i>	<i>26,76</i>	<i>5</i>	<i>-43,4</i>	<i>14,65</i>	<i>1,00</i>	<i>1,25</i>	<i>91</i>	<i>3,5</i>	<i>12,7</i>
#14	<i>0,47</i>	<i>34,45</i>	<i>3</i>	<i>-50,4</i>	<i>8,90</i>	<i>0,70</i>	<i>0,73</i>	<i>93</i>	<i>3,8</i>	<i>18,2</i>
#15	<i>0,556</i>	<i>26,95</i>	<i>3</i>	<i>-49,4</i>	<i>8,85</i>	<i>1,10</i>	<i>1,21</i>	<i>84</i>	<i>4,2</i>	<i>22,4</i>
#5	0,635	19,03	5	-51,0	8,45	1,00	1,22	76	3,2	3,9
#8	0,576	25,97	4	-44,3	9,00	1,00	1,4	102	3,8	15,6
#10	0,599	23,39	5	-49,0	8,95	1,00	1,01	98	4,1	11,0

Legenda: *Itálico = transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de alumina*

Negrito = transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi e pó de tungstênio

Preto = transdutores construídos com camada de retaguarda de epóxi, pó de tungstênio e pó de alumina

Sombreamento = transdutores construídos com camada de acoplamento acústico com espessura de $3\lambda/4$.

VI. Referências Bibliográficas

1. Aero-tech Reports - Ultrasonic Transducer Performance Parameters (1978). *Effects on Diagnostic Imaging: Axial Resolution*, 4 p.
2. Aero-tech Reports - Ultrasonic Transducer Performance Parameters (1979 a). *Effects on Diagnostic Imaging: Lateral Resolution*, 4 p.
3. Aero-tech Reports - Ultrasonic Transducer Performance Parameters (1980 a). *Effects on Diagnostic Imaging: Multiple Matching Layer Theory and Application*, 4 p.
4. Aero-tech Reports - Ultrasonic Transducer Performance Parameters (1979 b). *Effects on Diagnostic Imaging: Sensitivity I*, 5 p.
5. Aero-tech Reports - Ultrasonic Transducer Performance Specification (1980 b). *Test Methods, Definitions and Procedures*, 5 p.
6. AIUM (1992). *Acoustic Output Measurement and Labeling Standard for Diagnostic Ultrasound Equipment*. 121p.
7. ALVARENGA, X. Y., MACHADO, J. C. e PEREIRA, W. C. A. (2001). “Implementação do Protocolo para Obtenção de Parâmetros do Feixe Acústico de Transdutores Ultra-sônicos Usados em Medicina”. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v. 17, n. 3, p. 151-163.
8. ALVES, C.H.F., RITTER, T.A., SHUNG, K.K. (2000). “Transdutores de Alta Frequência Utilizando PVDF para Aplicações em Imagens Médicas”. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica 2000*, v. 1, p. 665-667.

9. ASTM E-1065 (1999). *Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units*, 121p.
10. ARNOLD, F. J. (1995). *O Pré-tensionamento Mecânico em Transdutores Piezoelétricos*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Biomédica, UNICAMP, Campinas, 156p.
11. BRITTAIN, R.H., WEIGHT, J.P. (1987). "Fabrication of Non-uniformly excited Wide-band Ultrasonic Transducers". *Ultrasonics*, v. 25, n. 2, p. 100-106.
12. BUTTON, V. L. S. N. (1998). *Efeitos da Polarização Não-uniforme de Cerâmicas Piezoelétricas no Campo de Transdutores de Ultra-som*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Biomédica, UNICAMP, Campinas, p. 198.
13. CHRISTENSEN, D. A. (1988). *Ultrasonic Bioinstrumentation*, New York, John Wiley & Sons.
14. CHURCH, D., PINCOCK, D. (1985). "Predicting the Electrical Equivalent of Piezoceramic Transducers for Small Acoustic Transmitters". *IEEE - Transactions on Sonics and Ultrasonics*, v. su-32, n. 1, p. 61-64.
15. COHEN, Y. B., STUBBS, D. A., HOPPE, W. C. (1984). "Multiphase Backing Materials for Piezoelectric Broadband Transducers", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 75, n. 5, p. 1629-1633.
16. DESILETS, C. S., FRASER, J. D., KINO, G. S. (1978). "The Design of Efficient Broad-Band Piezoelectric Transducers". *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, v. su-25, n. 3, p. 115-125.
17. FERROPERM PRODUCT SUPPORT (1990). *Piezoceramics Ferroperm*, 20p.
18. GALLEGO, J. A. (1989). "Piezoelectric Ceramics and Ultrasonic Transducers", *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, v. 22, p.804-816.

19. GENG, X., ZHANG, Q. M. (1999). "Resonance Modes and Losses in 1-3 Piezocomposites for Ultrasonic Transducer Applications". *Journal of Applied Physics*, v. 85, n. 3, p. 1342-1350.
20. GOLL, J. H., AULD, B. A. (1975). "Multilayer Impedance Matching Schemes for Broadbanding of Water Loaded Piezoelectric Transducers and High Q Electric Resonators". *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, v. su-22, n. 1, p. 52-53.
21. GRECO, A. V. D., PEREIRA, W. C. A., MACHADO, J. C. (1997). "Modelo Misto de Propagação Ultra-sônica para Estimativa Simultânea da Espessura e Velocidade da Onda em Meios Multicamadas". *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v.13, n. 3, p. 7-17.
22. GUO, N., CAWLEY, P., (1991). "Transient Response of Piezoelectric Discs to Applied Voltage Pulses". *Ultrasonics*, v. 29, n. 3, p. 208-217.
23. HUETER, F., BOLT, R.H. (1955) *Sonics: Techiques for the use of Sound and Ultrasound in Engineering and Science*, New York, ed. John Wiley & Sons.
24. HUNT, J. W., ARDITI, M., FOSTER, F. S. (1983). "Ultrasound Transducers for Pulse-Echo Medical Imaging". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 30, n. 5, p. 453-481.
25. IEC-1390 (1996). *Ultrasonics- Real Time Pulse-Echo Systems- Test Procedures to Determine Performance Specifications*, 49 p.
26. IEC-1157 (1992). *Requirements for the Declaration of the Acoustic Output of Medical Diagnostic Ultrasonic Equipment*, 62 p.
27. IEC-1088 (1991). *Characteristics and Measurements of Ultrasonic Piezoceramic Transducers*, 35 p.

28. IEEE American National Standard Std 790. (1989). *IEEE Guide for Medical Ultrasound Field Parameter Measurements*, 94 p.
29. IEEE American National Standard Std 176 (1978). IEEE Standard on Piezoelectricity, 55p.
30. INOUE, T., OHTA, M., TAKAHASHI, S. (1987). "Design of Ultrasonic Transducers with Multiple Acoustic Matching Layers for Medical Applications". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 34, no. 1, p. 8-16.
31. KINSLER, L.E., FREY, A.R., COPPENS, A.B., SANDERS, J.V. (1982) *Fundamental of Acoustics*, 3^a ed., Singapore, ed. John Wiley & Sons.
32. KÖCIS, S., FIGURA, Z. (1996) *Ultrasonic Measurements and Technologies*, London, ed. Chapman & Hall, 218p.
33. KOSSOFF, G. (1966). "The Effects of Backing and Matching on the Performance of Piezoelectric Ceramic Transducers". *IEEE - Transactions on Sonics and Ultrasonics*, v. su-13, n. 1, p. 20-30.
34. LANG, M. E. (1992). *Utilização Conjunta de Cerâmica e Polímero Piezoelétricos em um Transdutor Ultra-sônico*, Tese de Mestrado, Engenharia Biomédica COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 57 p.
35. LINES, M. E., GLASS, A M. (1977). "Principles and Application of Ferroelectrics Related Material". Oxford: Clarendon Press.
36. LOCKWOOD, G. R., TURNBULL, D. H., FOSTER, F. S. (1994). "Fabrication of High Frequency Spherically Shaped Ceramic Transducers". *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 41, n. 2, p. 231-235.

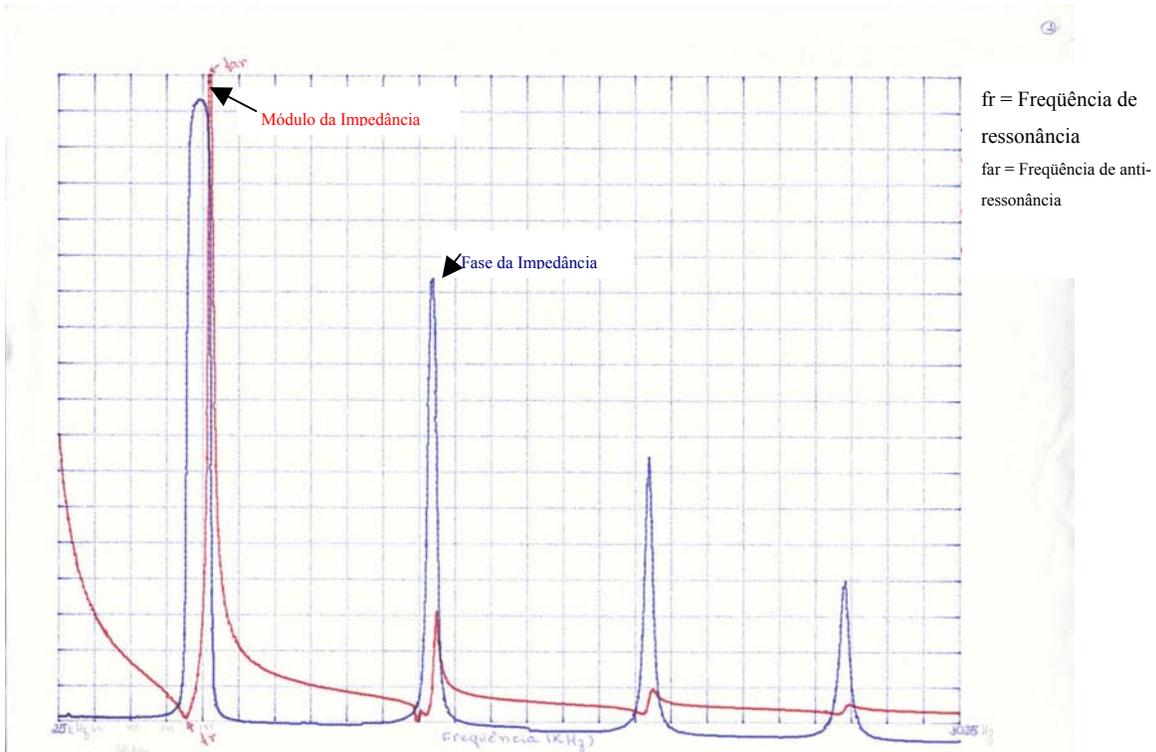
37. MARTIN, R. W., SIGELMANN, R. A. (1975). "Force and Electrical Thévenin Equivalent Circuits and Simulations for Thickness Mode Piezoelectric Transducers". *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 58, n. 2, p. 475-489.
38. MASON, W. P. (1964). *Physical Acoustics – Principles and Methods*, v.1 part A, 2nd ed. New York: Academic Press.
39. MEDINA, L.A.H. (1989). *Projeto e Construção de Transdutor Ultra-sônico Multicamadas para o Regime Pulsátil*, Tese de Mestrado, Engenharia Biomédica COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 75 p.
40. MITRA, R., SAKSENA, T. K. (1995). "Study on the Vibrational Characteristics of Ultrasonic Transducers Using Tapered Piezoelectric Ceramic Elements". *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 58, n.2, p. 323-329.
41. PEREIRA, W. C. A., GLÓRIA, L. A. S., MACHADO, J. C. (1996). "Backing Layer Optimization for High Frequency Ultrasonic Transducer for Biomedical Applications". *Anais III Fórum Nacional de Ciência e Tecnologia em Saúde, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, v. 1, p. 293-299.
42. PERSON, H. W., HERTZ, C. H. (1985). "Acoustic Impedance Matching of Medical Ultrasound Transducers". *Ultrasonics*, v. 23, n. 2, p. 83-89.
43. SAYERS, C. M., TAIT, C. E. (1984). "Ultrasonic Properties of Transducer Backing", *Ultrasonics*, v. 22, n. 2, p. 57-60.
44. SCHAFER, M. E., LEWIN, P. A. (1988). "A Computerized System for Measuring the Acoustic Output from Diagnostic Ultrasound Equipment.", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 35, n. 2, p. 102-109.

45. SEYED-BOLORFOROSH, M. S. (1995). "Novel Integrated Matching Layer".
IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v. 42, n. 5, p. 809-811.
46. SOUQUET, J., DEFRANOULD, P., DESBOIS, J. (1979) "Design of Low-Loss Wide-Band Ultrasonic Transducers for Noninvasive Medical Application.", *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, v. 26, n.2, p. 75-81.
47. TEIRLINK, C. J.P.M., BEZEMER, R.A., KOLLMANN, C., LUBBERS, J., HOSKINS, P. R., FISH, P., FREDFELDT, K.E., SCHAARSCHMIDT, U. (1998) "Development of an Example Flow Test Object and Comparison of five of these Test Objects, Constructed in various Laboratories", *Ultrasonics*, v.36, p. 653-660.
48. TUPHOLME, G.E. (1969) "Generation of Acoustic Pulses by Baffled Plane Pistons", *Mathematika*, vol.16, pp 209-224.
49. ZEMANECK, J. (1970) "Beam Behavior within the Nearfield of a Vibrating Piston", *Journal of Acoustical Society of America*, vol.49, no.1 (part 2), pp 181-191.

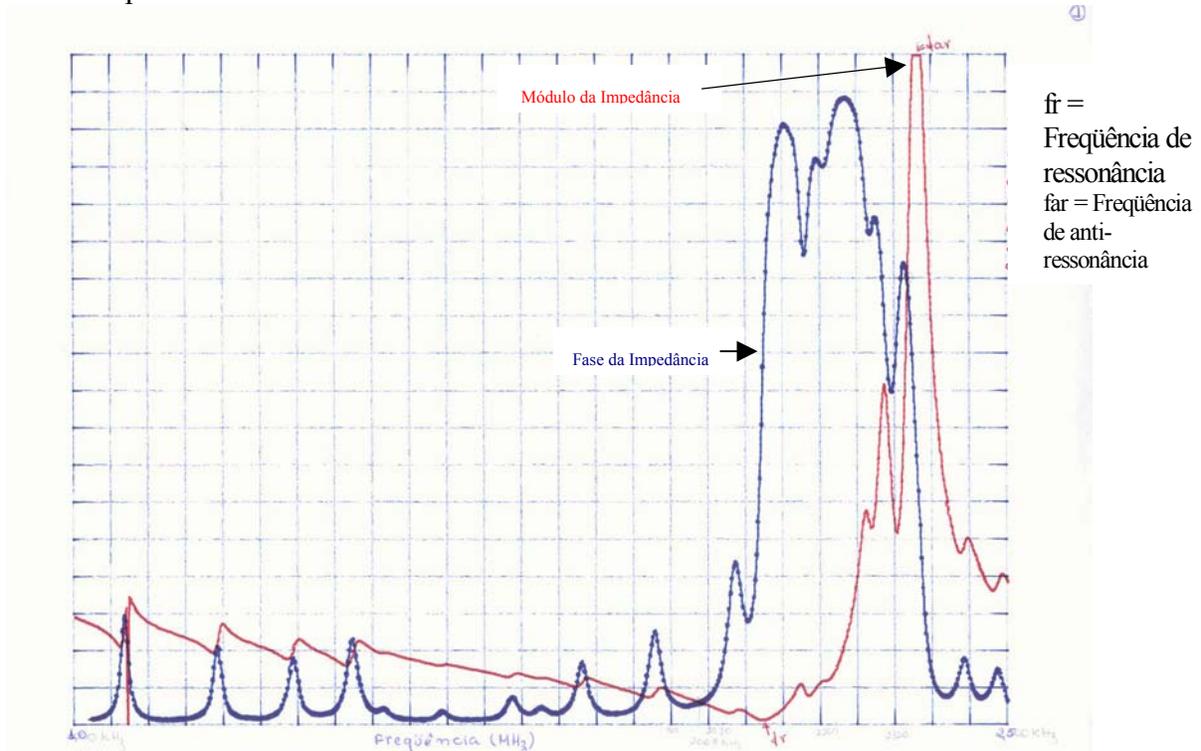
Apêndice A

Curvas de módulo e fase da Impedância *versus* frequência para as cerâmicas vibrando livremente

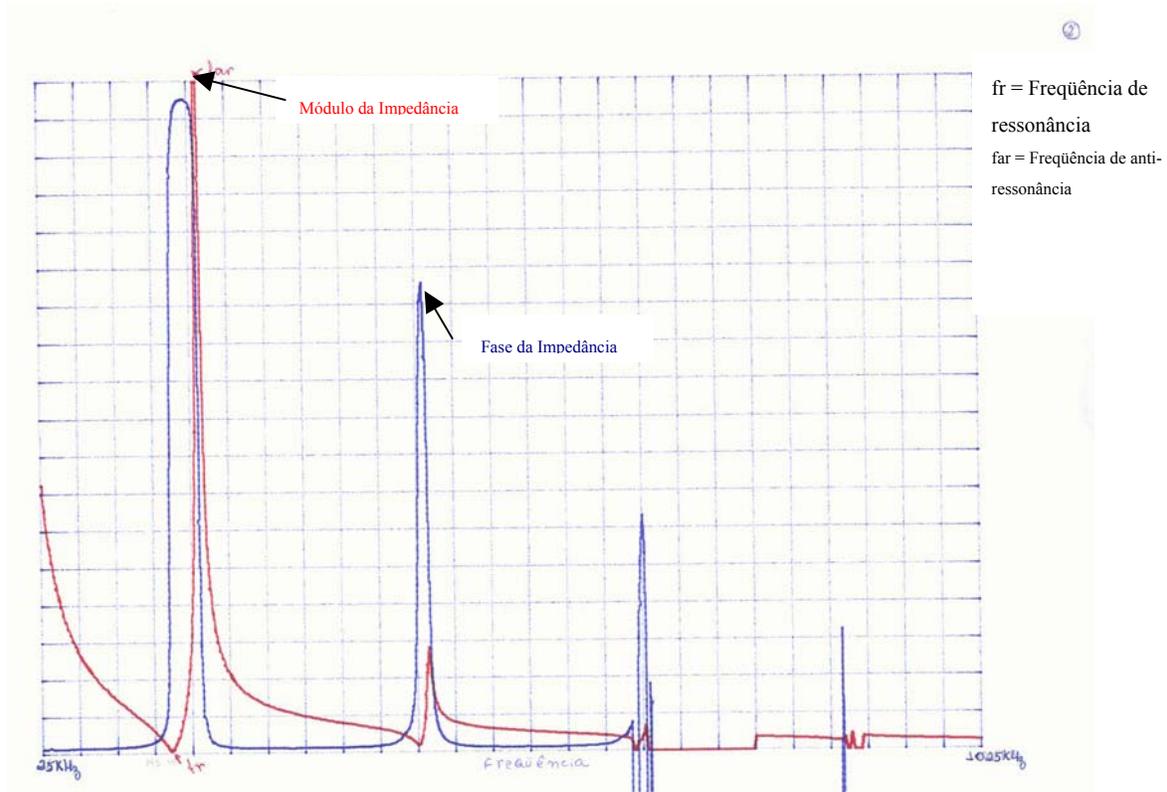
Cerâmica 1
Modo radial



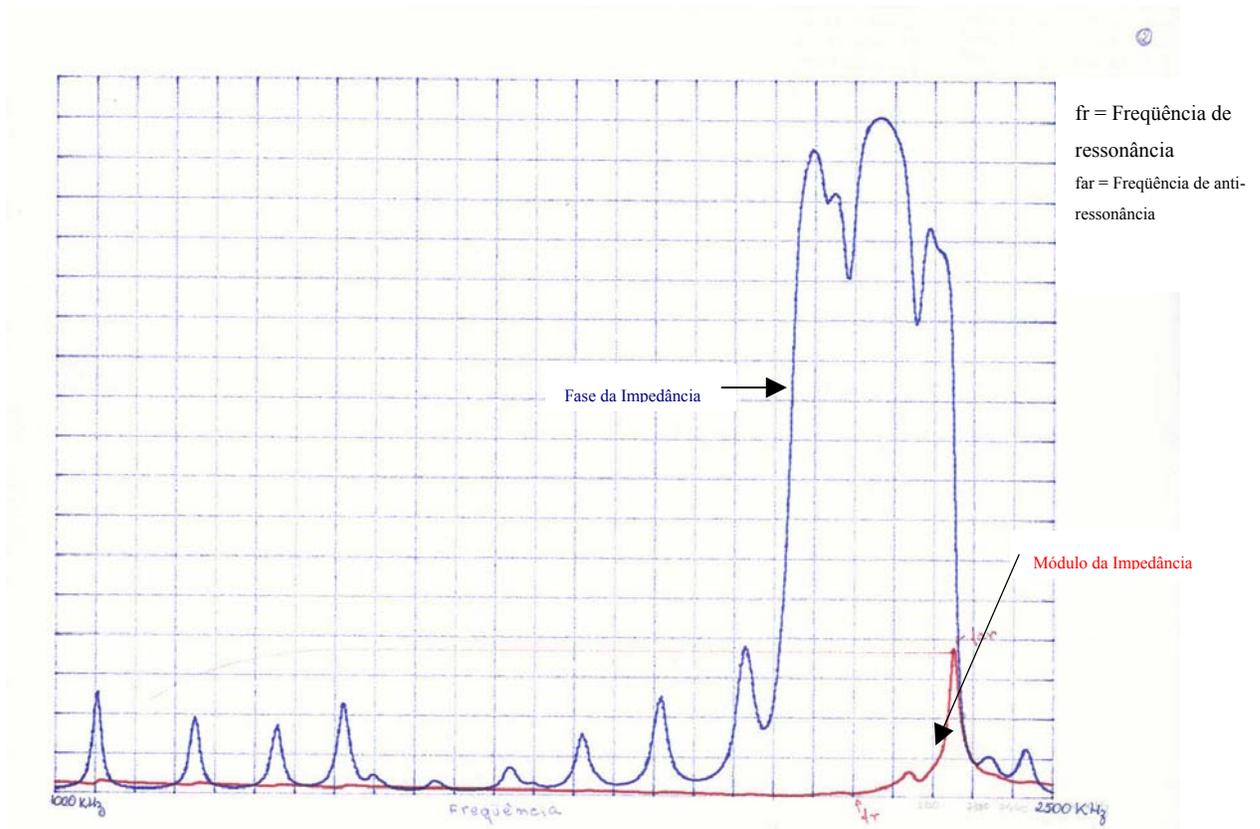
Modo espessura



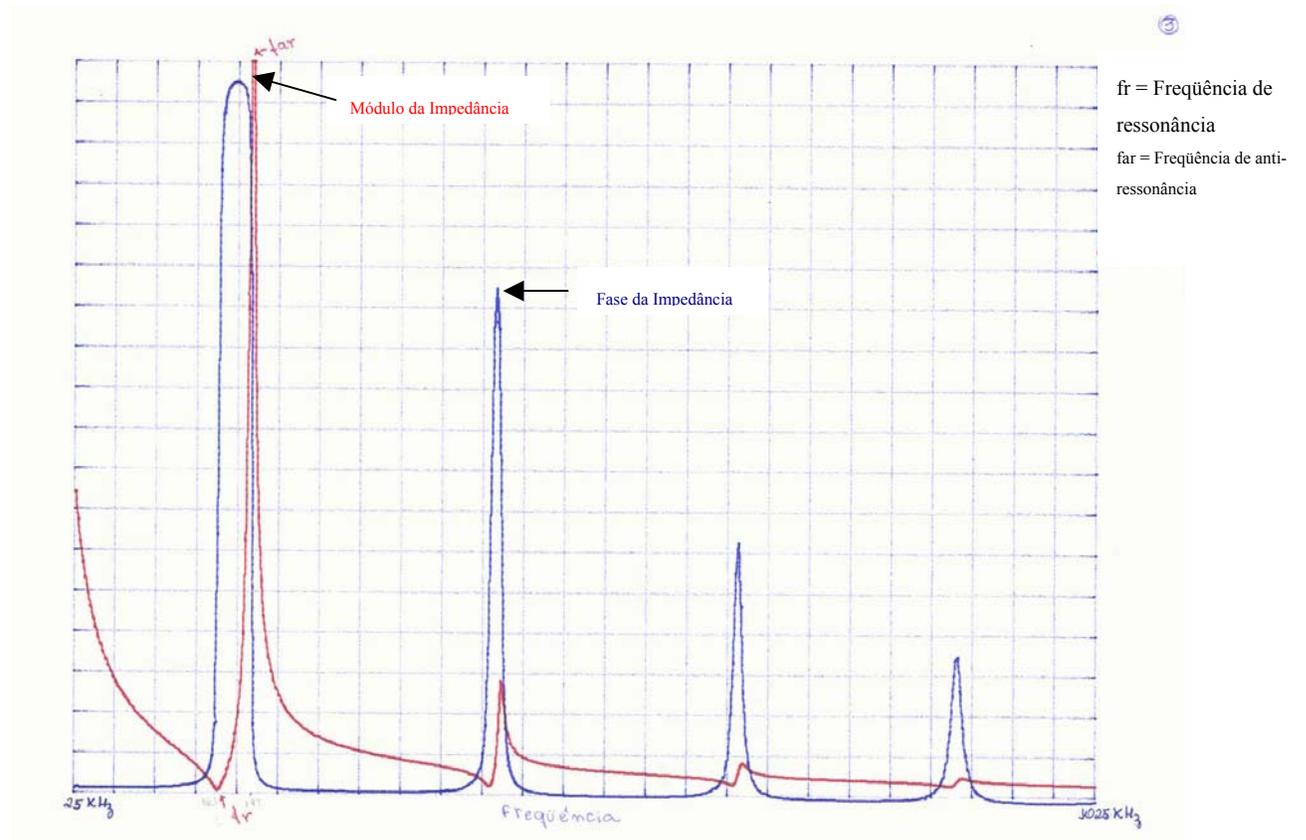
Cerâmica 2
Modo radial



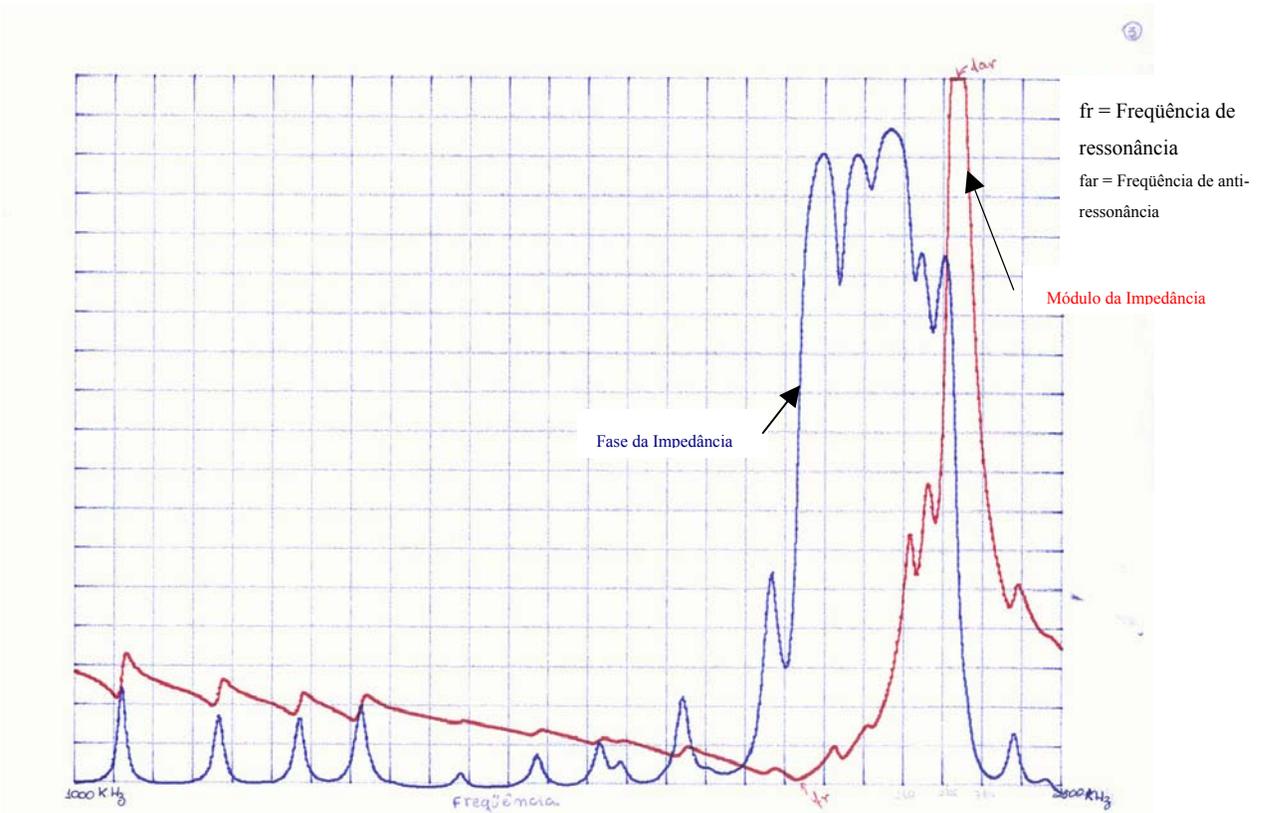
Modo espessura



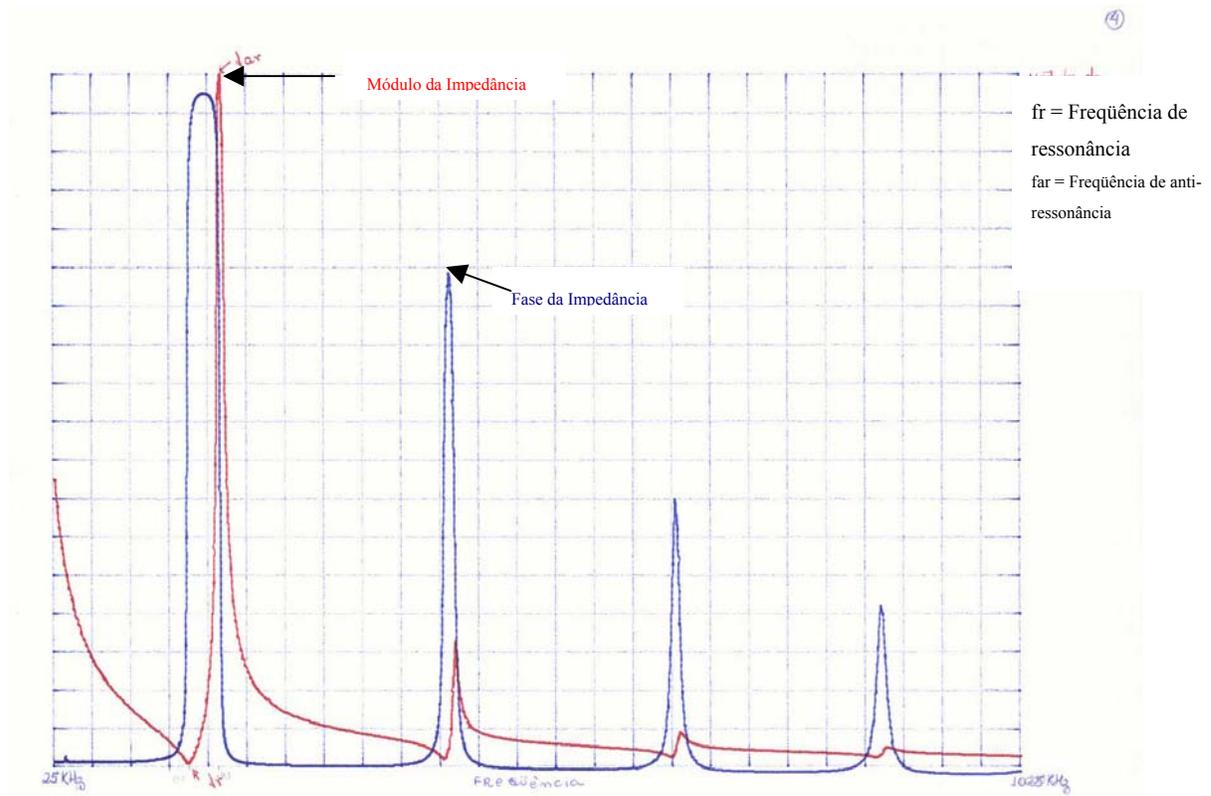
Cerâmica 3
Modo radial



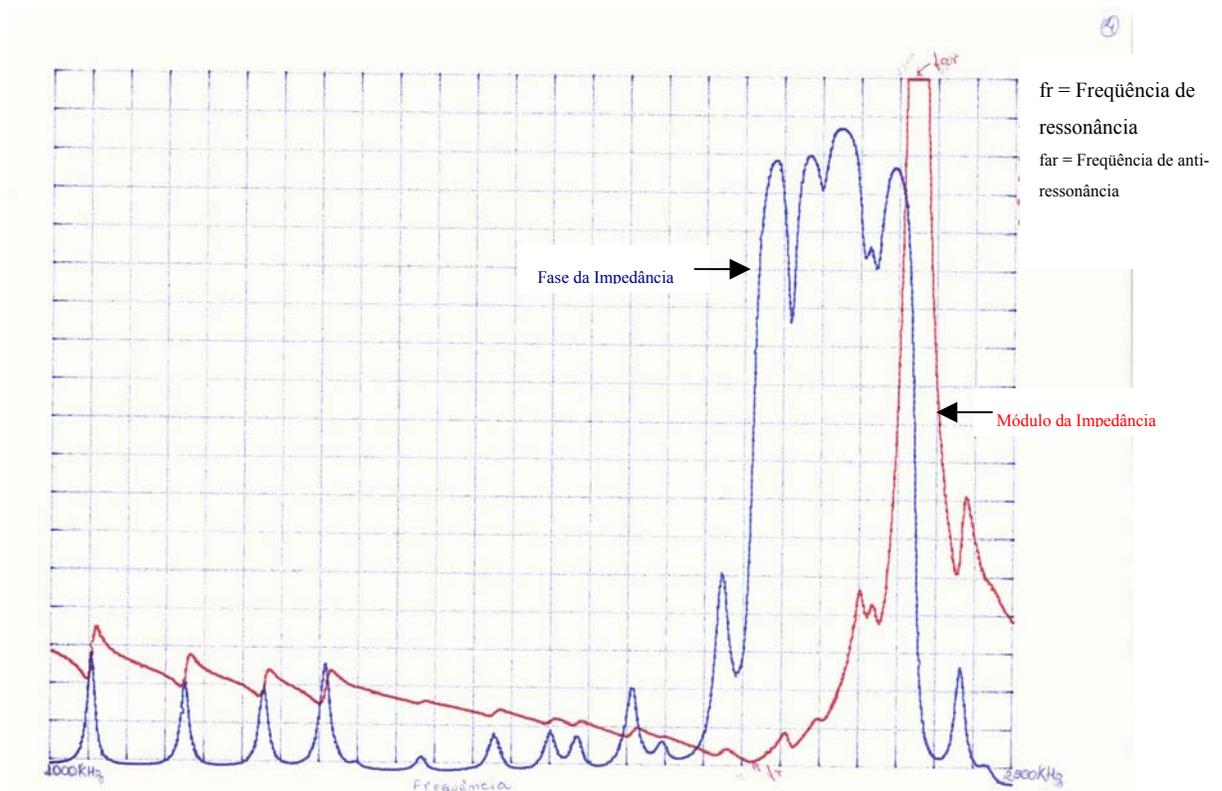
Modo espessura



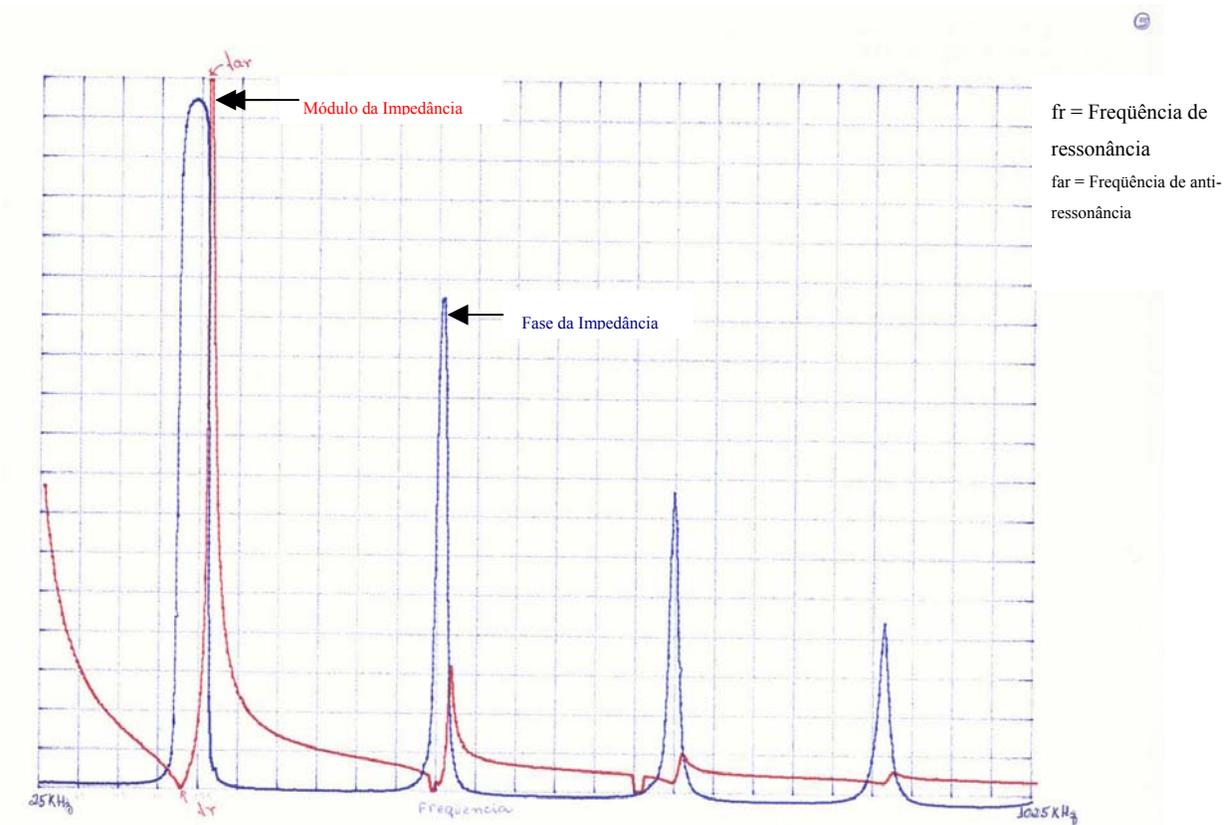
Cerâmica 4
Modo radial



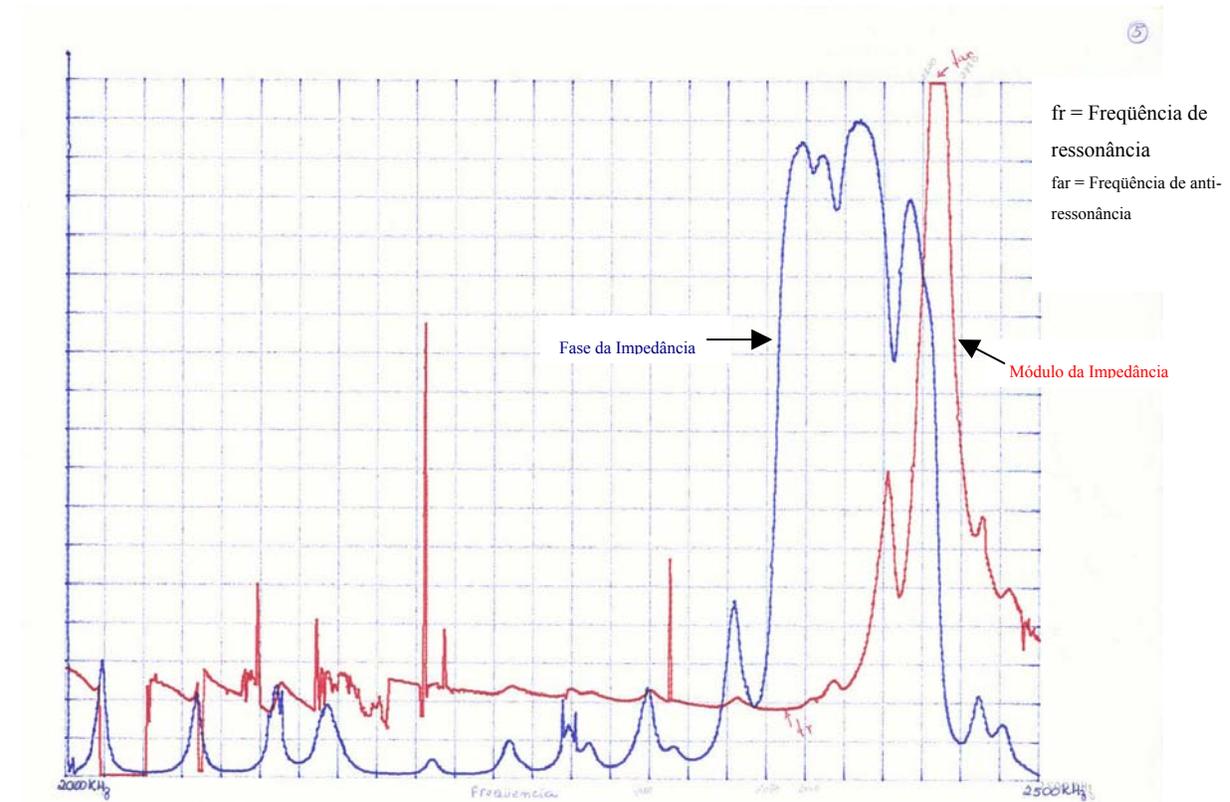
Modo espessura



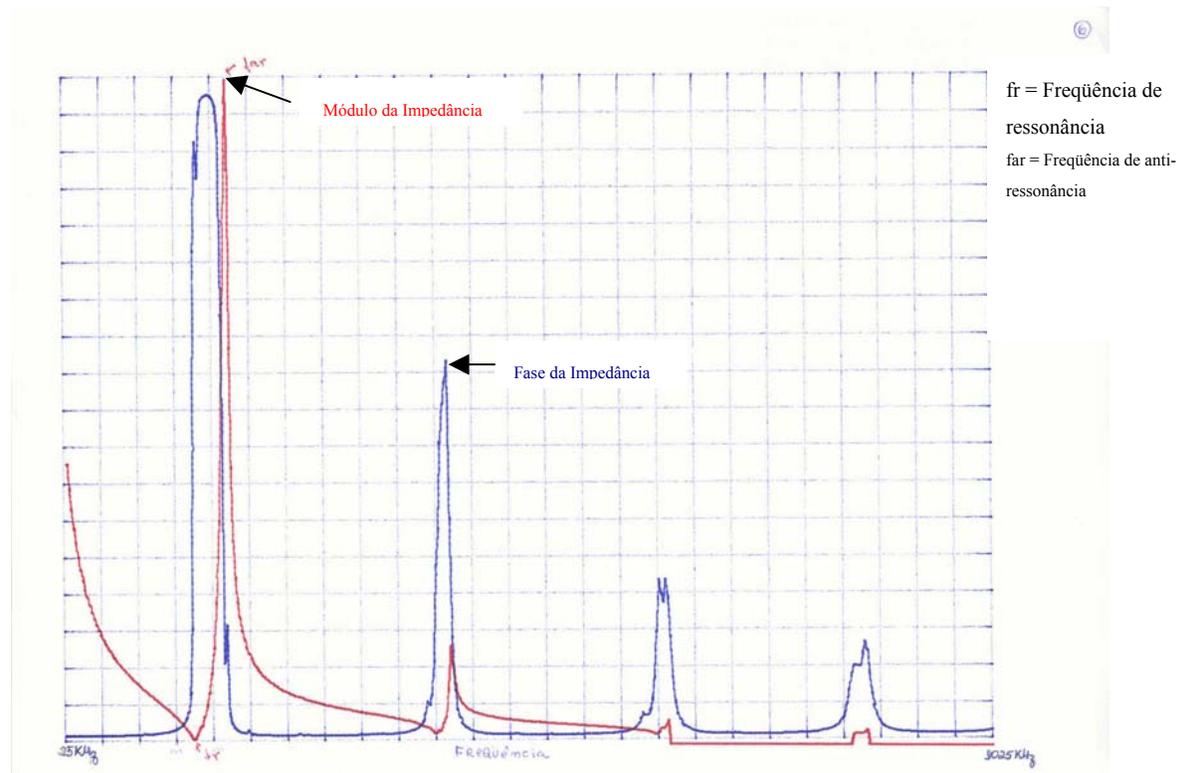
Cerâmica 5
Modo radial



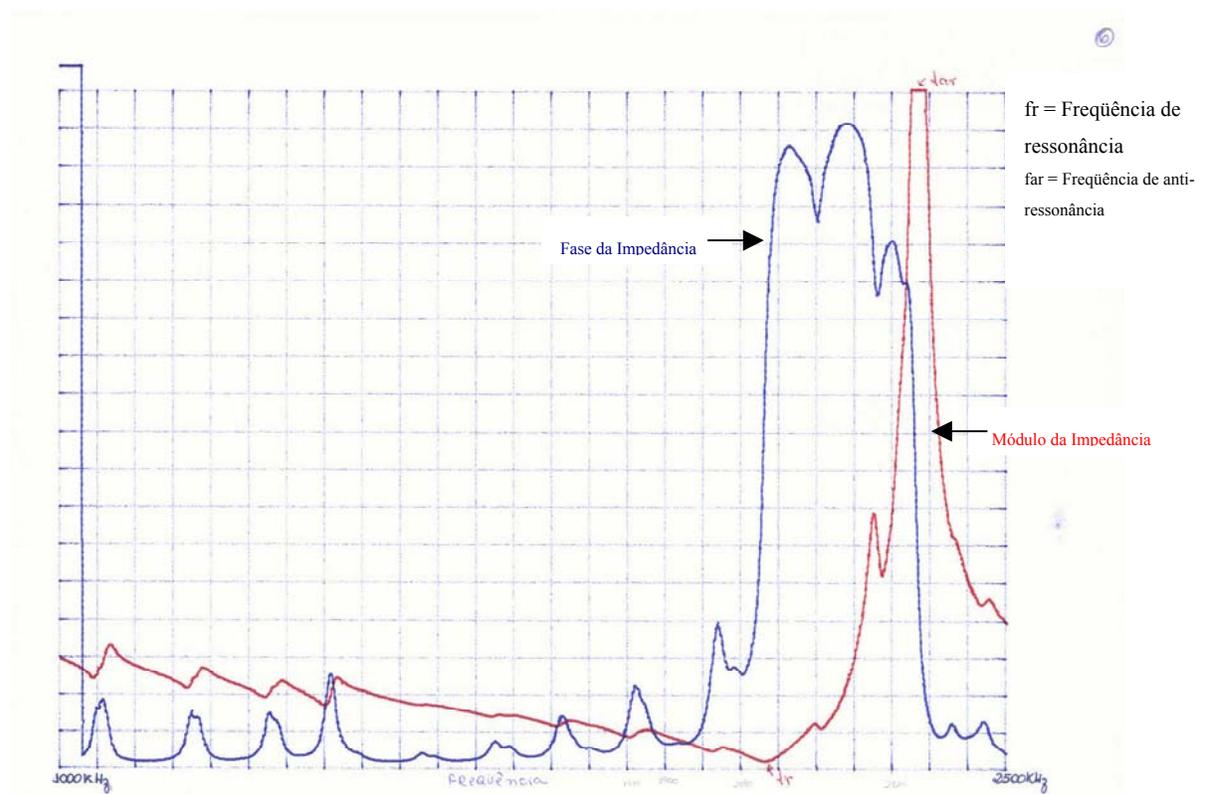
Modo espessura



Cerâmica 6 Modo radial

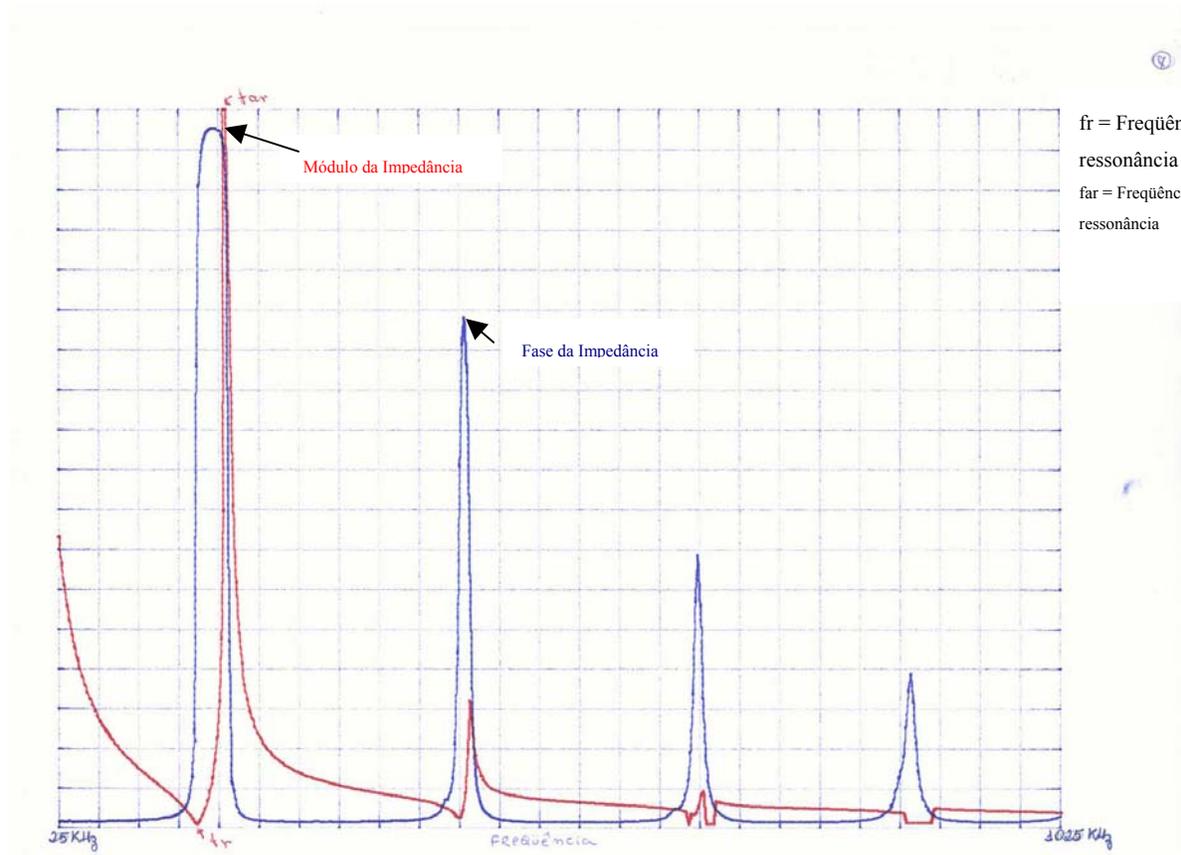


Modo espessura



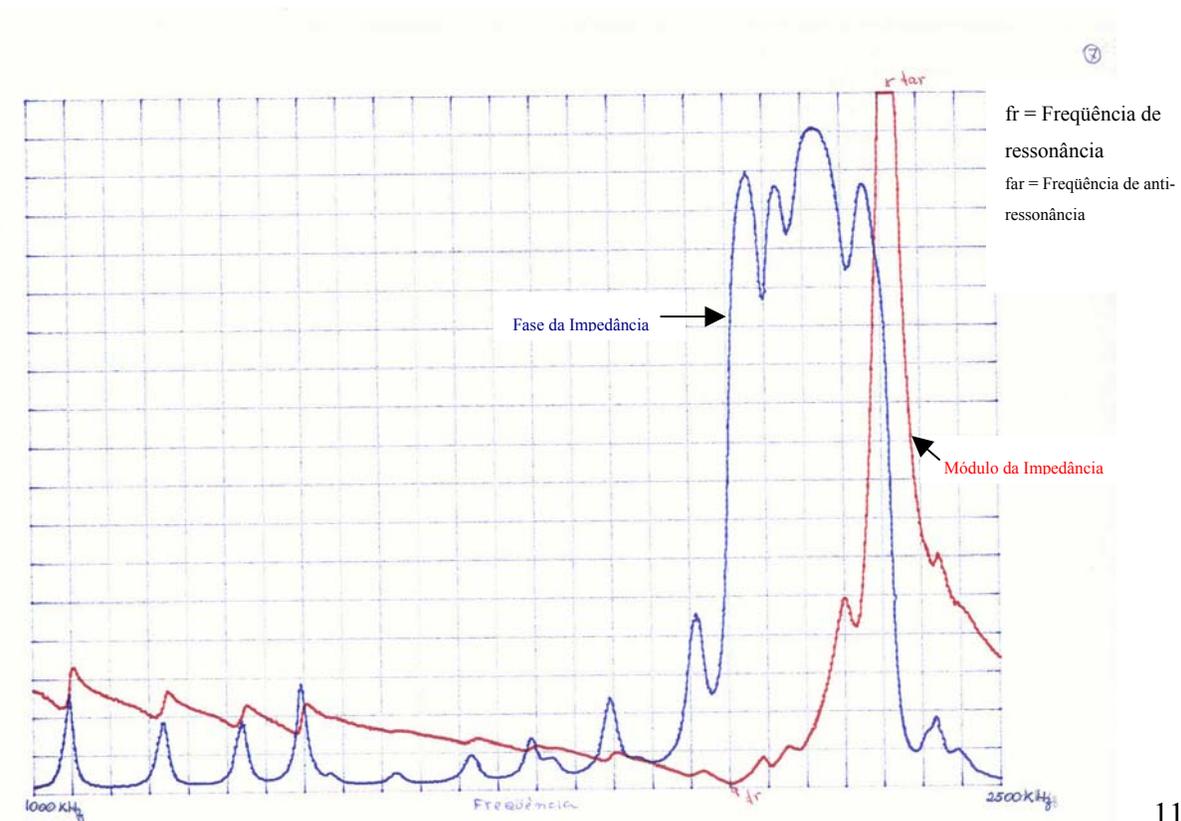
Cerâmica 7

Modo radial



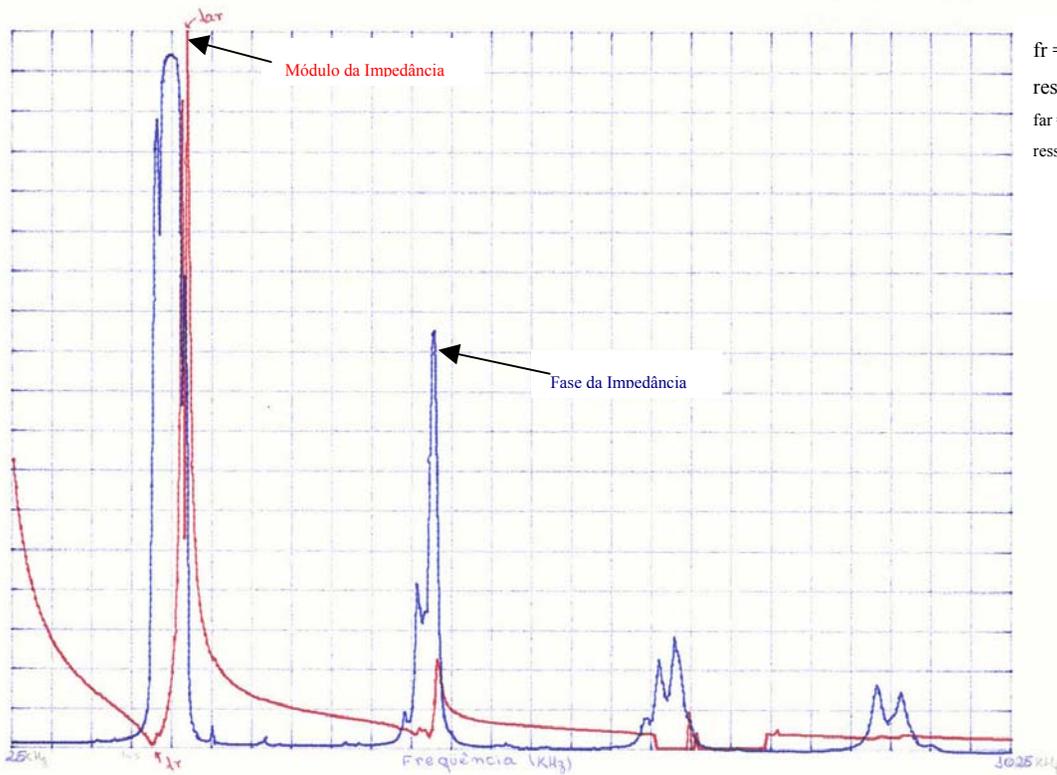
f_r = Frequência de ressonância
 f_{ar} = Frequência de anti-ressonância

Modo espessura



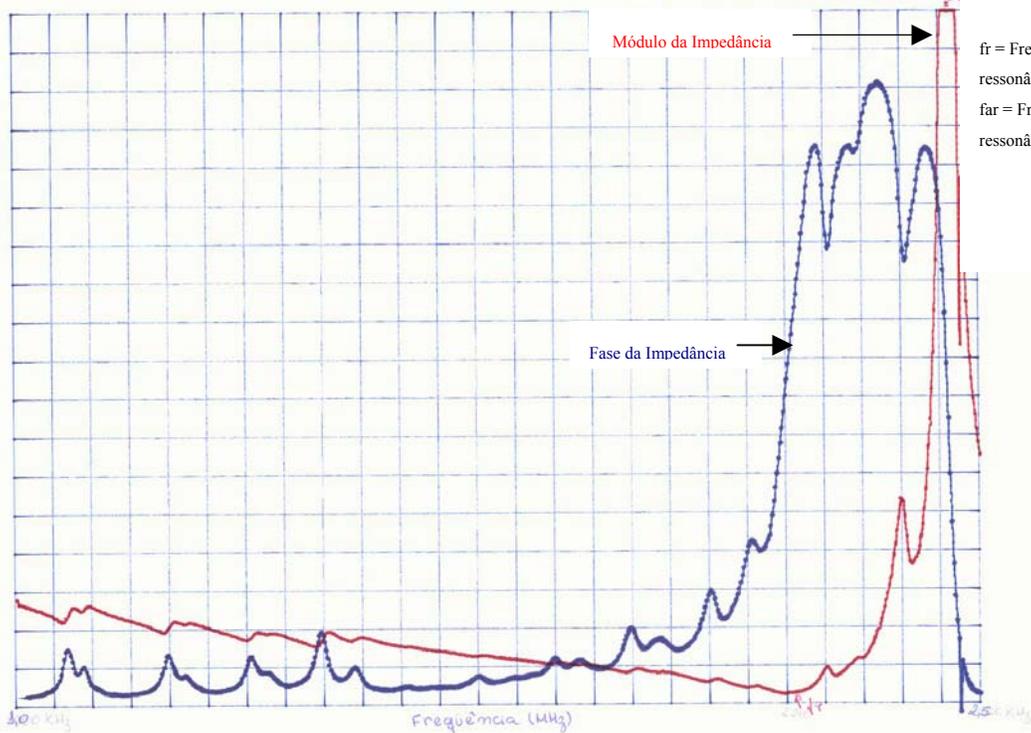
f_r = Frequência de ressonância
 f_{ar} = Frequência de anti-ressonância

Cerâmica 8
Modo radial



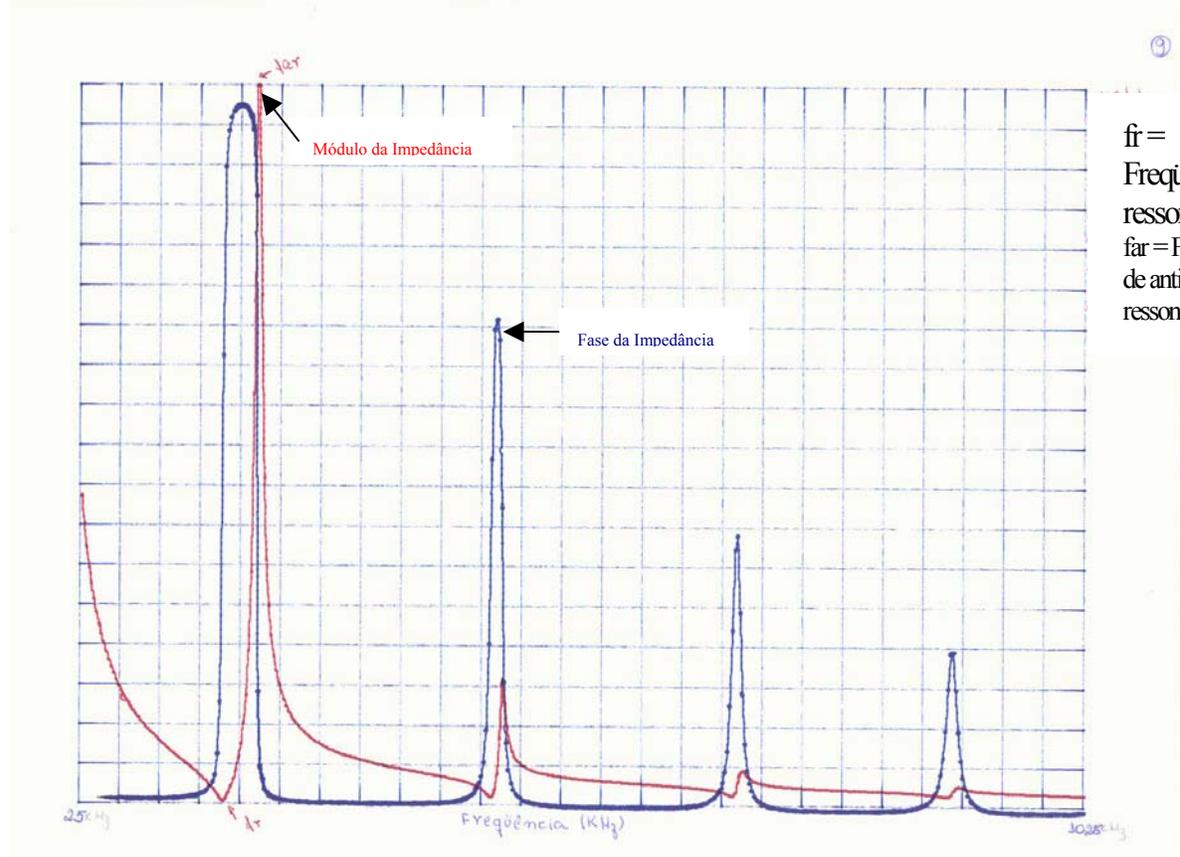
fr = Frequência de ressonância
far = Frequência de anti-ressonância

Modo espessura

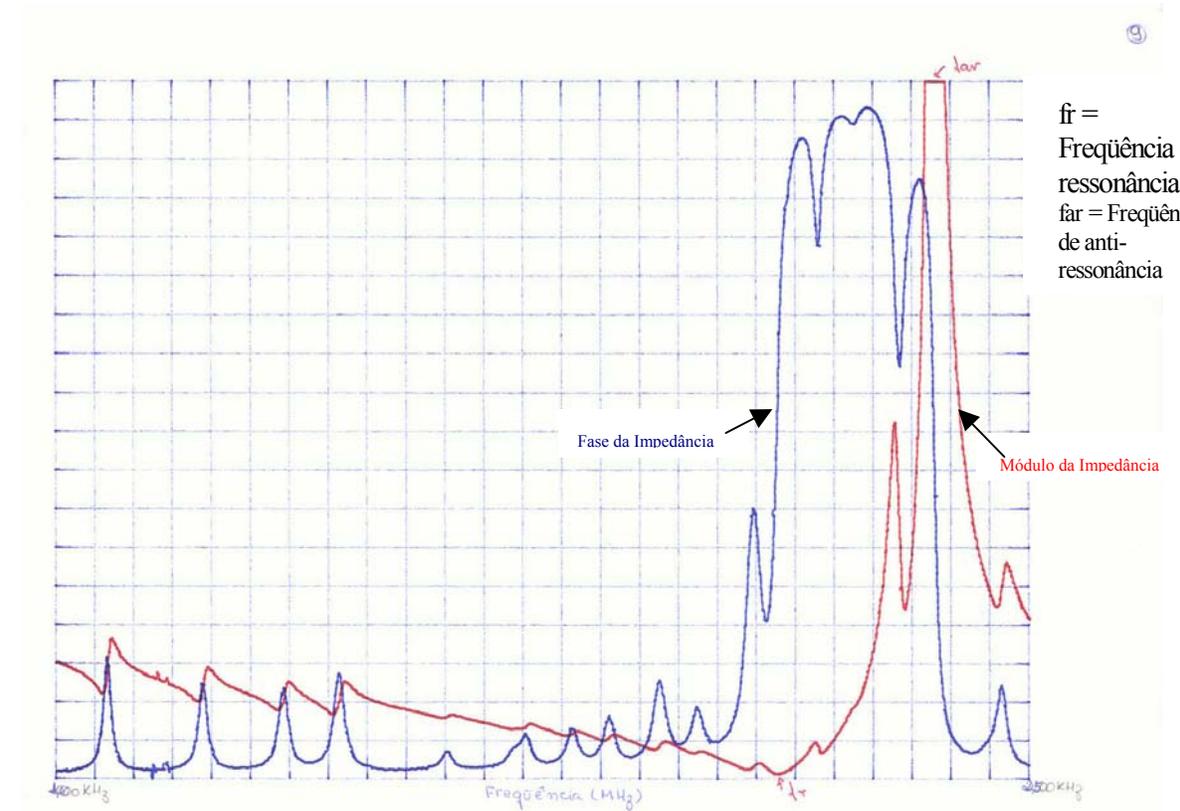


fr = Frequência de ressonância
far = Frequência de anti-ressonância

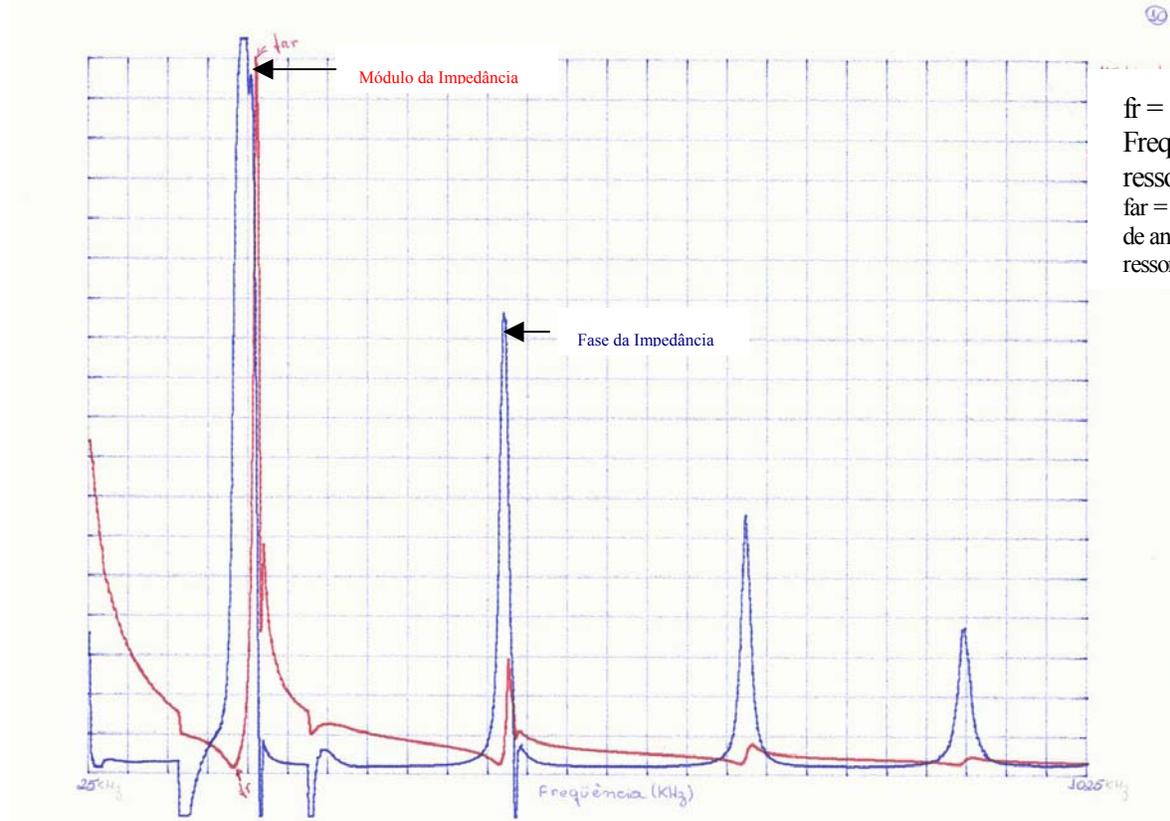
Cerâmica 9
Modo radial



Modo espessura

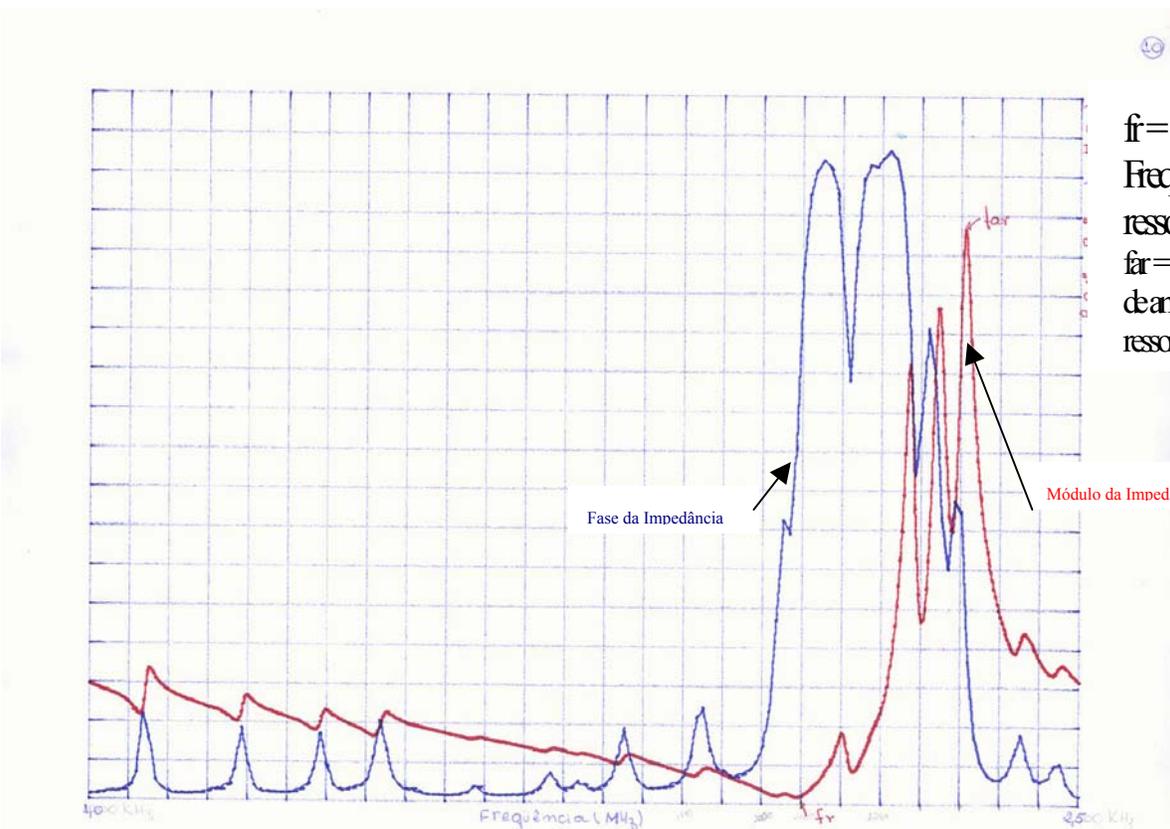


Cerâmica 10
Modo radial



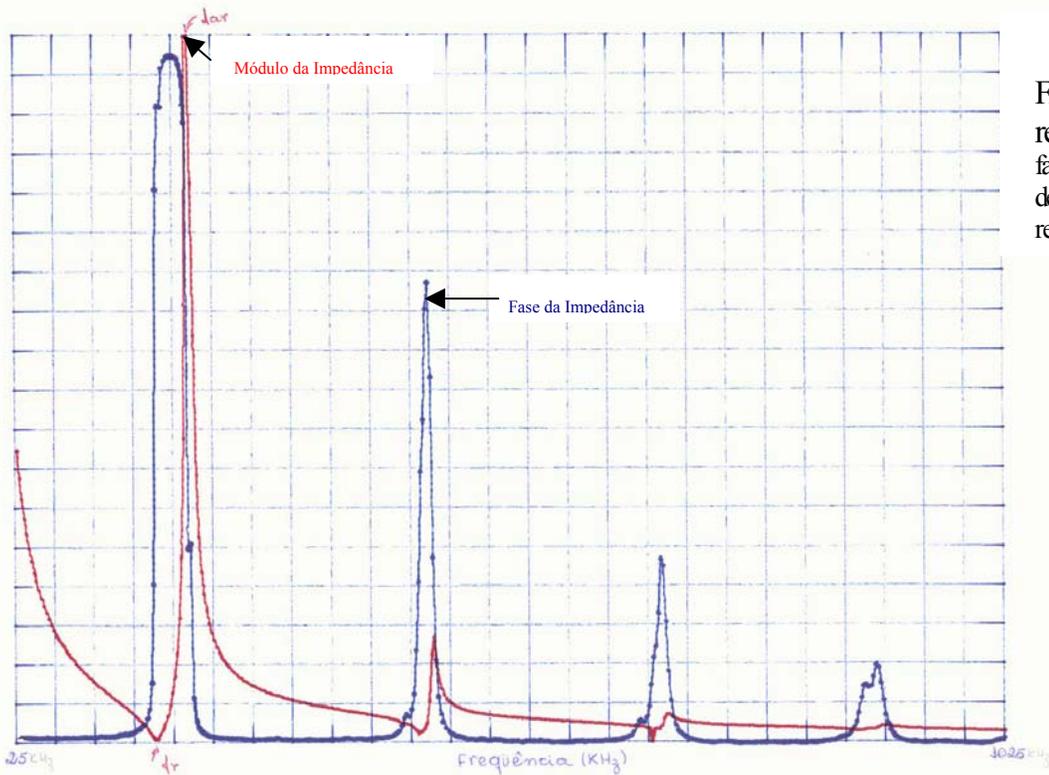
f_r =
Frequência de
ressonância
 f_{ar} = Frequência
de anti-
ressonância

Modo espessura



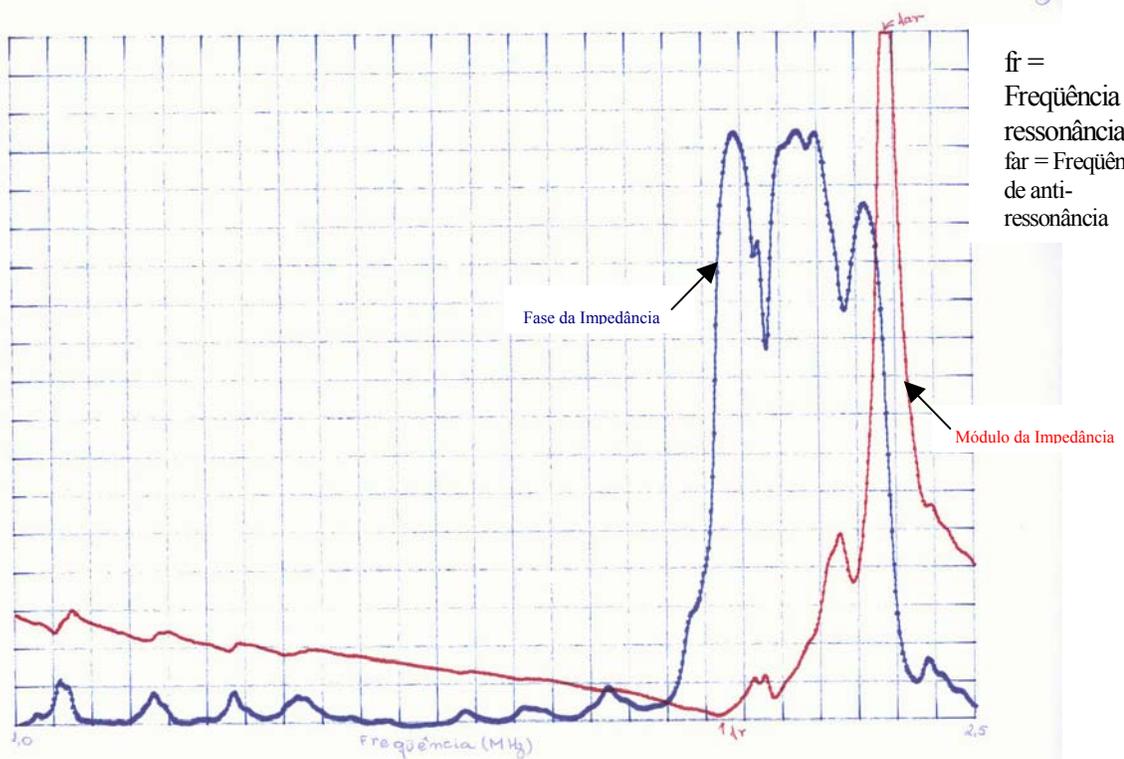
f_r =
Frequência de
ressonância
 f_{ar} = Frequência
de anti-
ressonância

Cerâmica 11
Modo radial



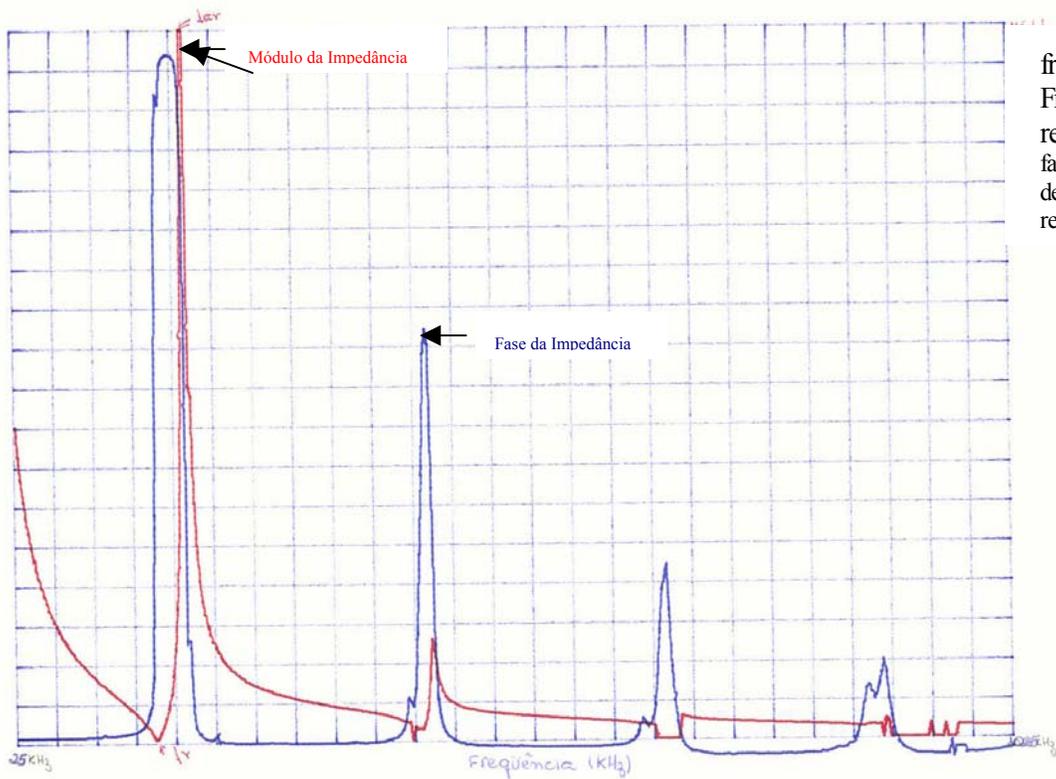
Frequência de
ressonância
 f_r = Frequência
de anti-
ressonância

Modo espessura



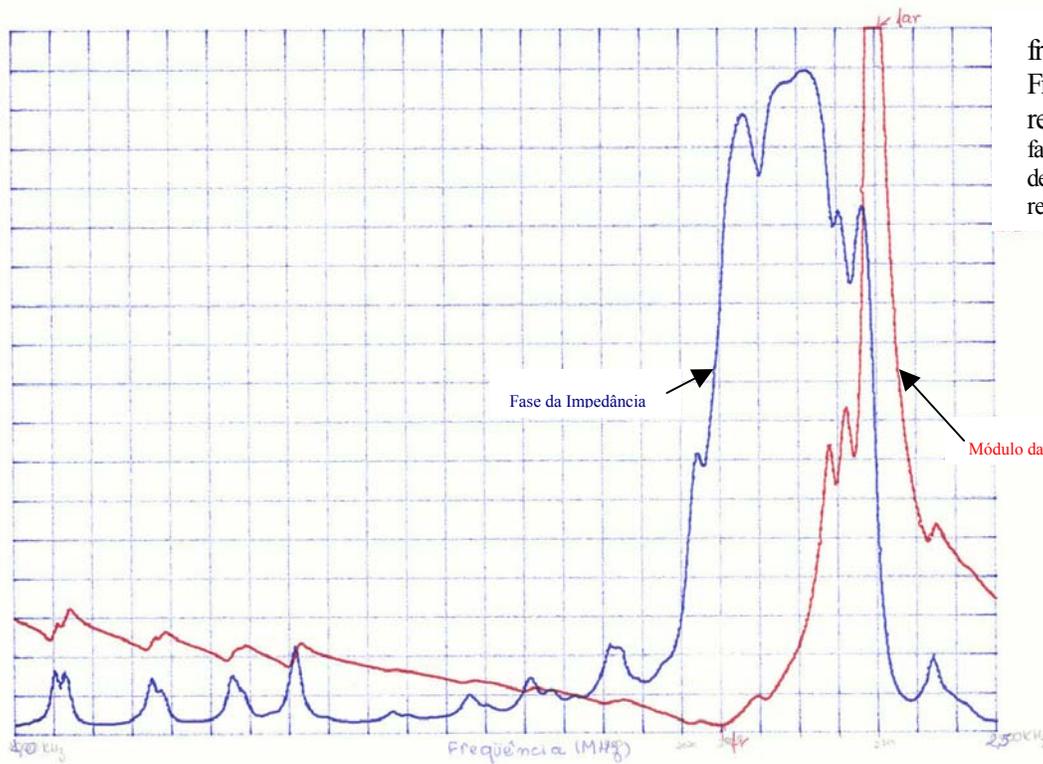
f_r =
Frequência de
ressonância
 f_{ar} = Frequência
de anti-
ressonância

Cerâmica 12
 Modo radial



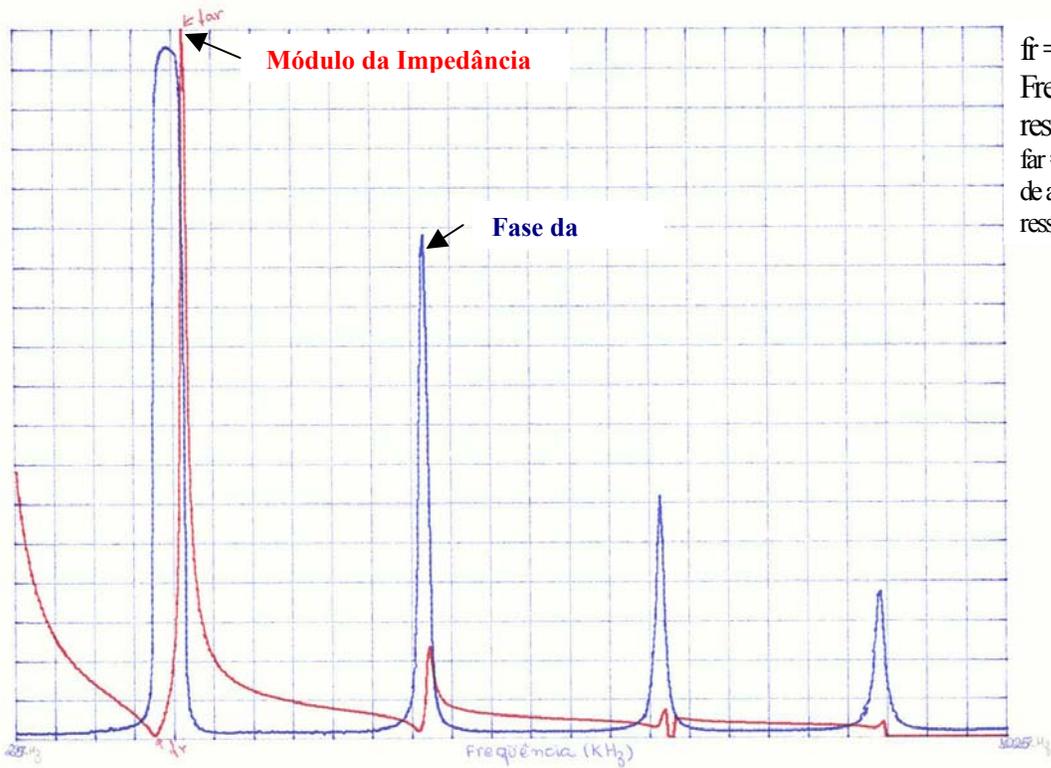
$f_r =$
 Frequência de
 ressonância
 $f_{ar} =$ Frequência
 de anti-
 ressonância

Modo espessura



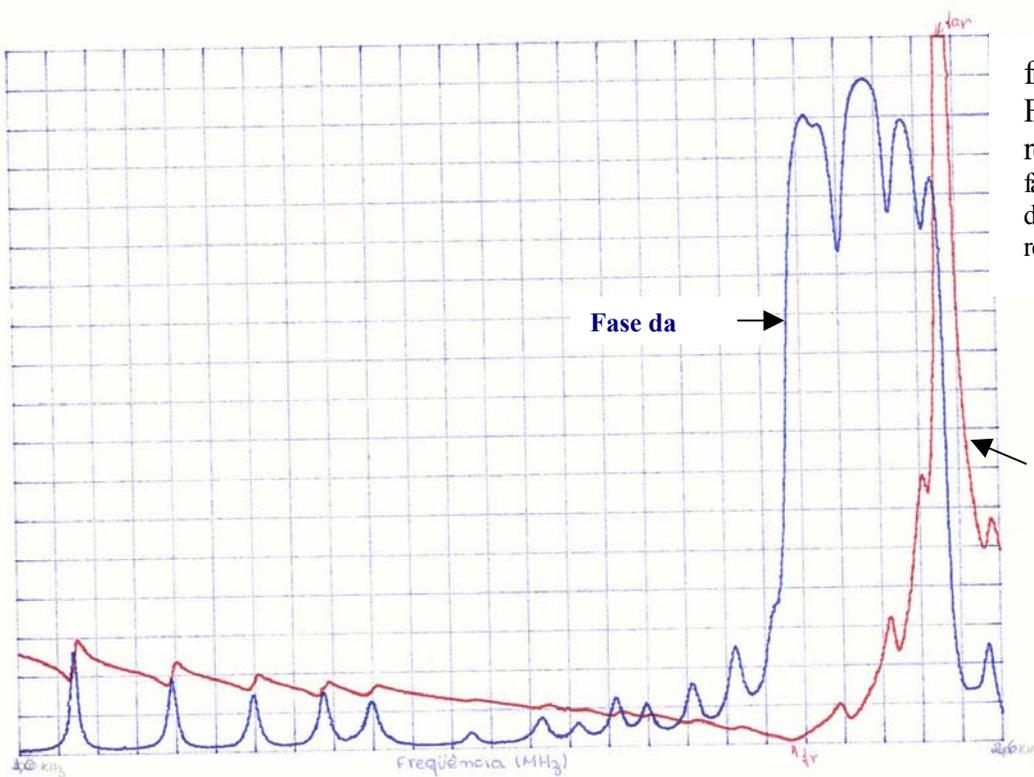
$f_r =$
 Frequência de
 ressonância
 $f_{ar} =$ Frequência
 de anti-
 ressonância

Cerâmica 13
Modo radial



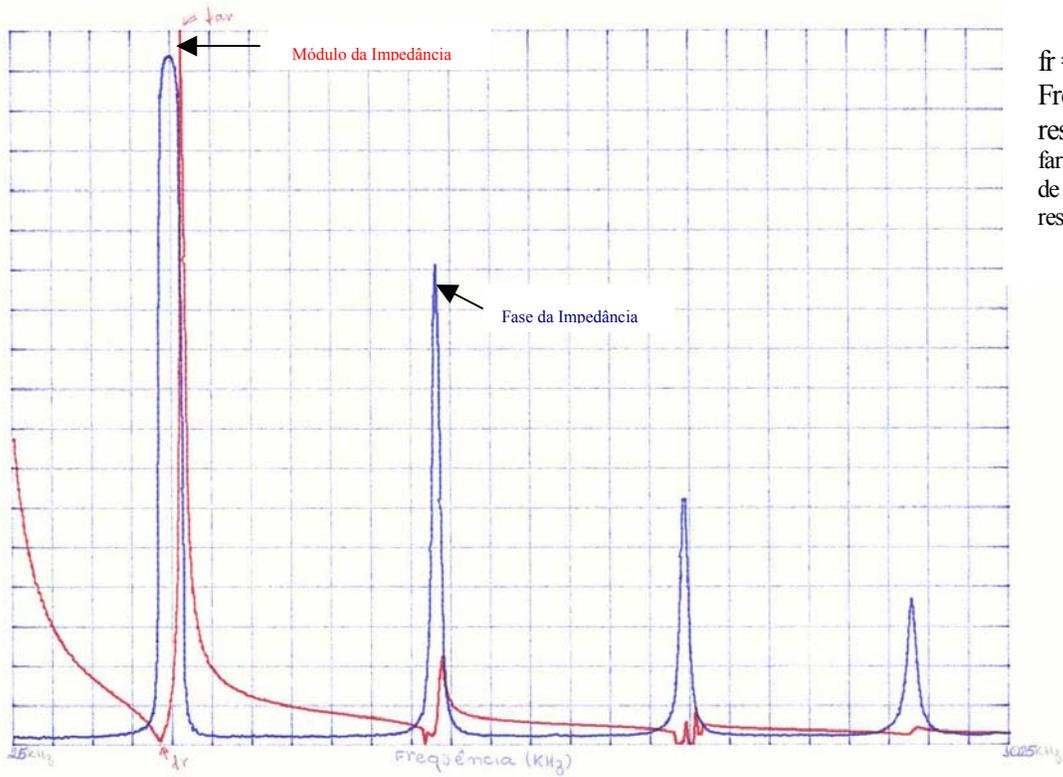
fr =
 Frequência de
 ressonância
 far = Frequência
 de anti-
 ressonância

Modo espessura



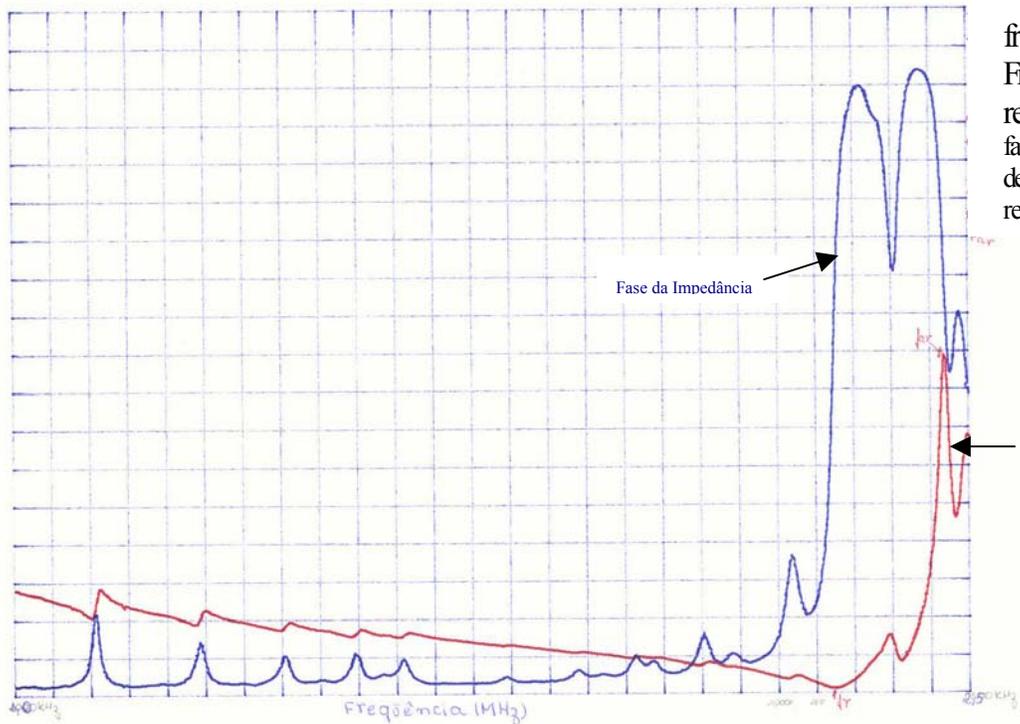
fr =
 Frequência de
 ressonância
 far = Frequência
 de anti-
 ressonância

Cerâmica 14
 Modo radial



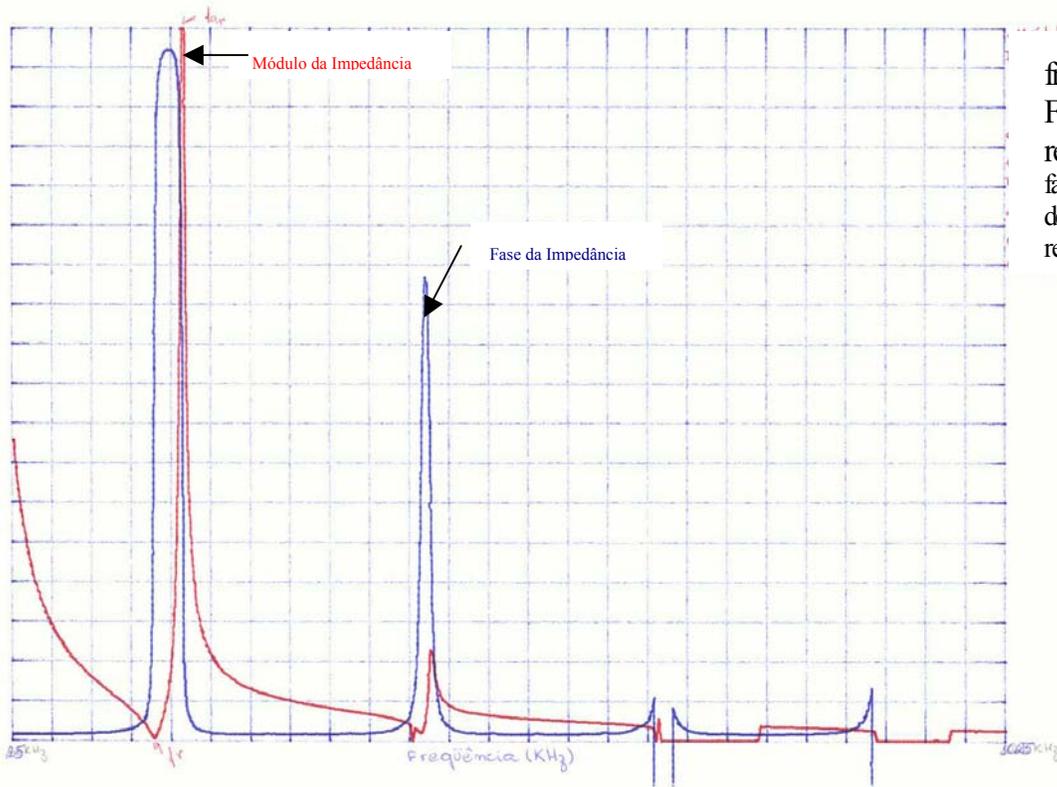
fr =
 Frequência de
 ressonância
 far = Frequência
 de anti-
 ressonância

Modo espessura



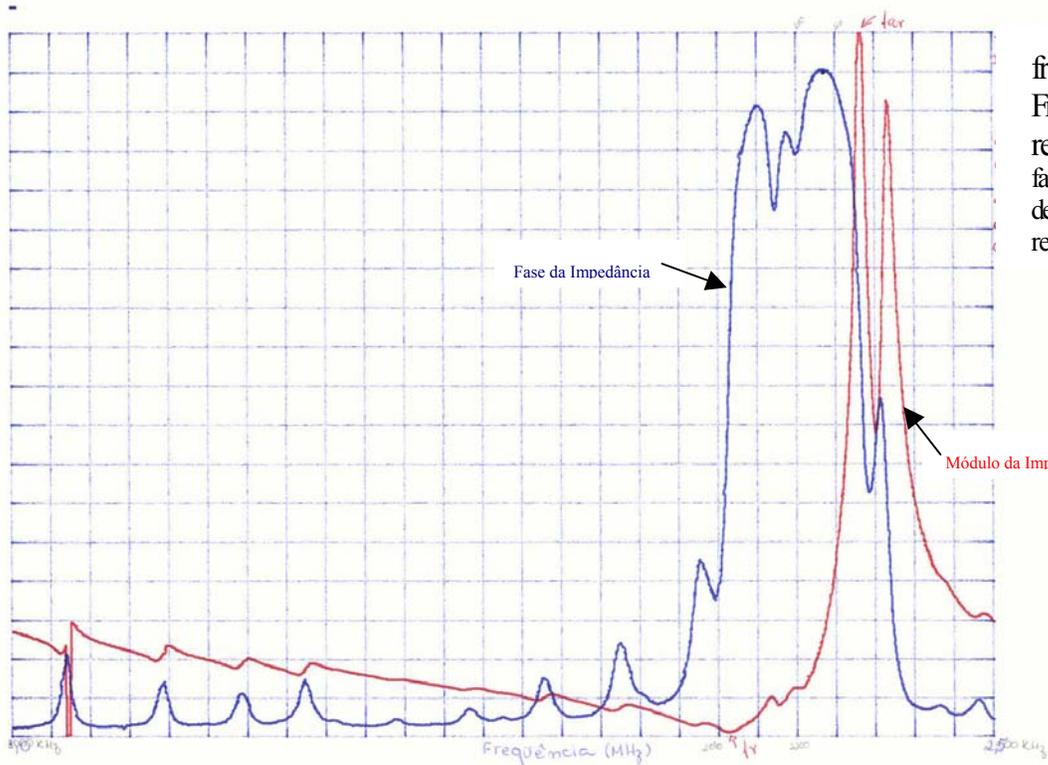
fr =
 Frequência de
 ressonância
 far = Frequência
 de anti-
 ressonância

Cerâmica 15
 Modo radial



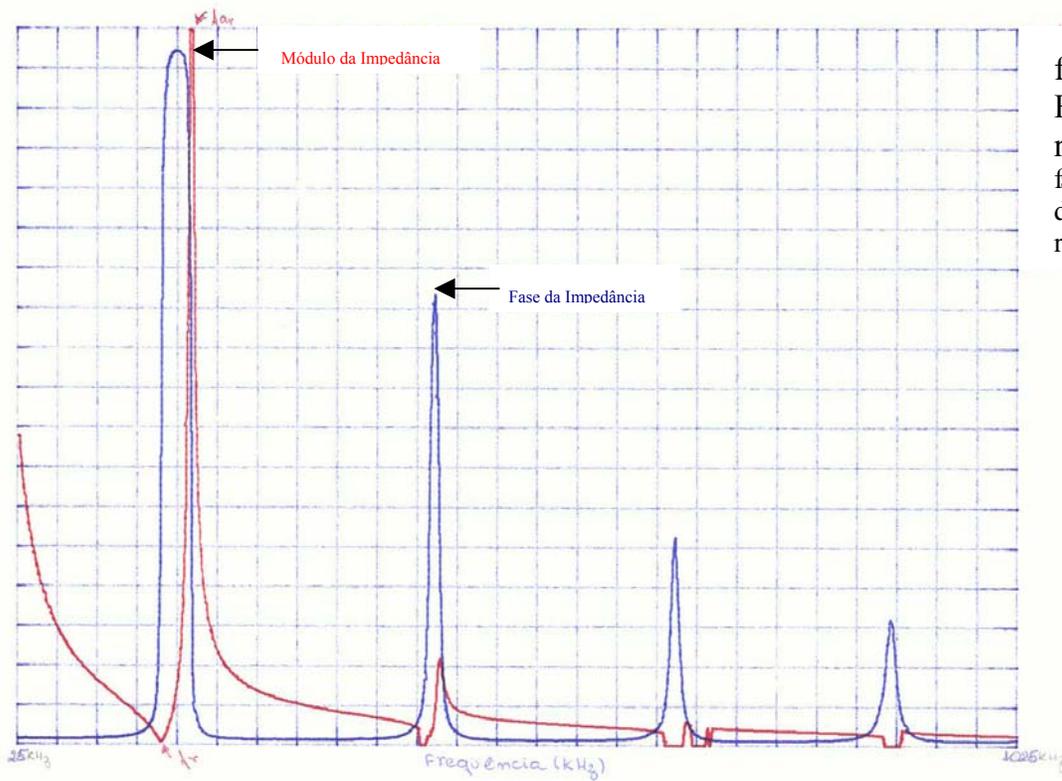
fr =
 Frequência de
 ressonância
 far = Frequência
 de anti-
 ressonância

Modo espessura



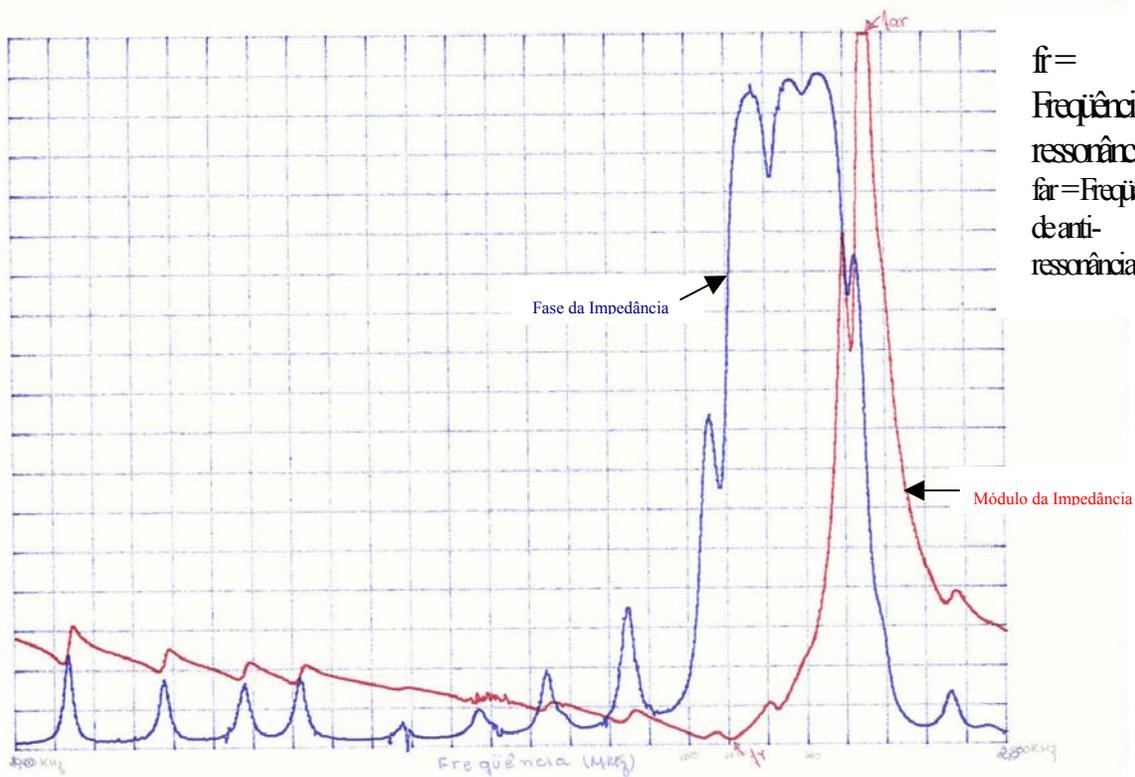
fr =
 Frequência de
 ressonância
 far = Frequência
 de anti-
 ressonância

Cerâmica 16
 Modo radial



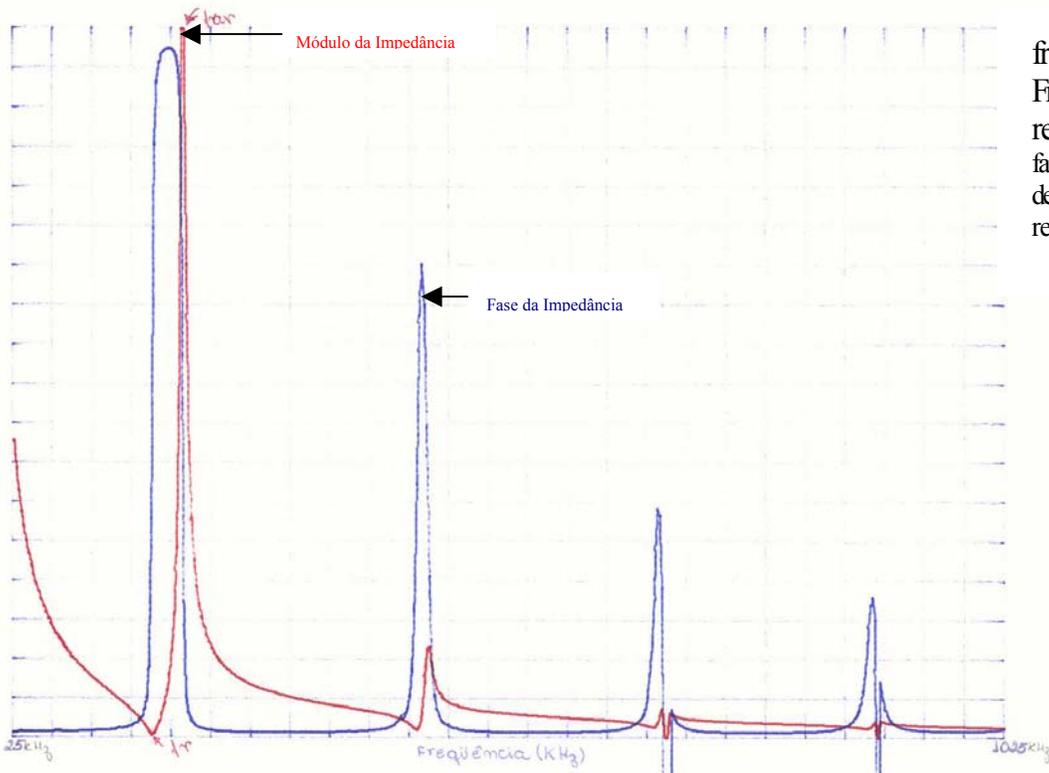
f_r =
 Frequência de
 ressonância
 f_{ar} = Frequência
 de anti-
 ressonância

Modo espessura



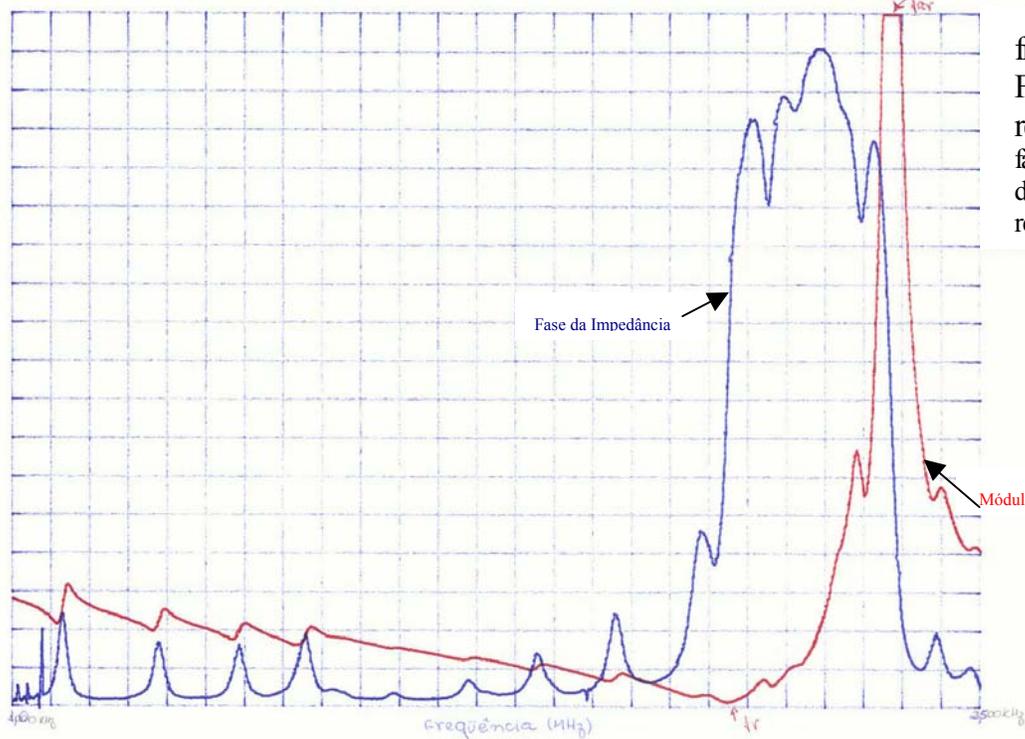
f_r =
 Frequência de
 ressonância
 f_{ar} = Frequência
 de anti-
 ressonância

Cerâmica 17
 Modo radial



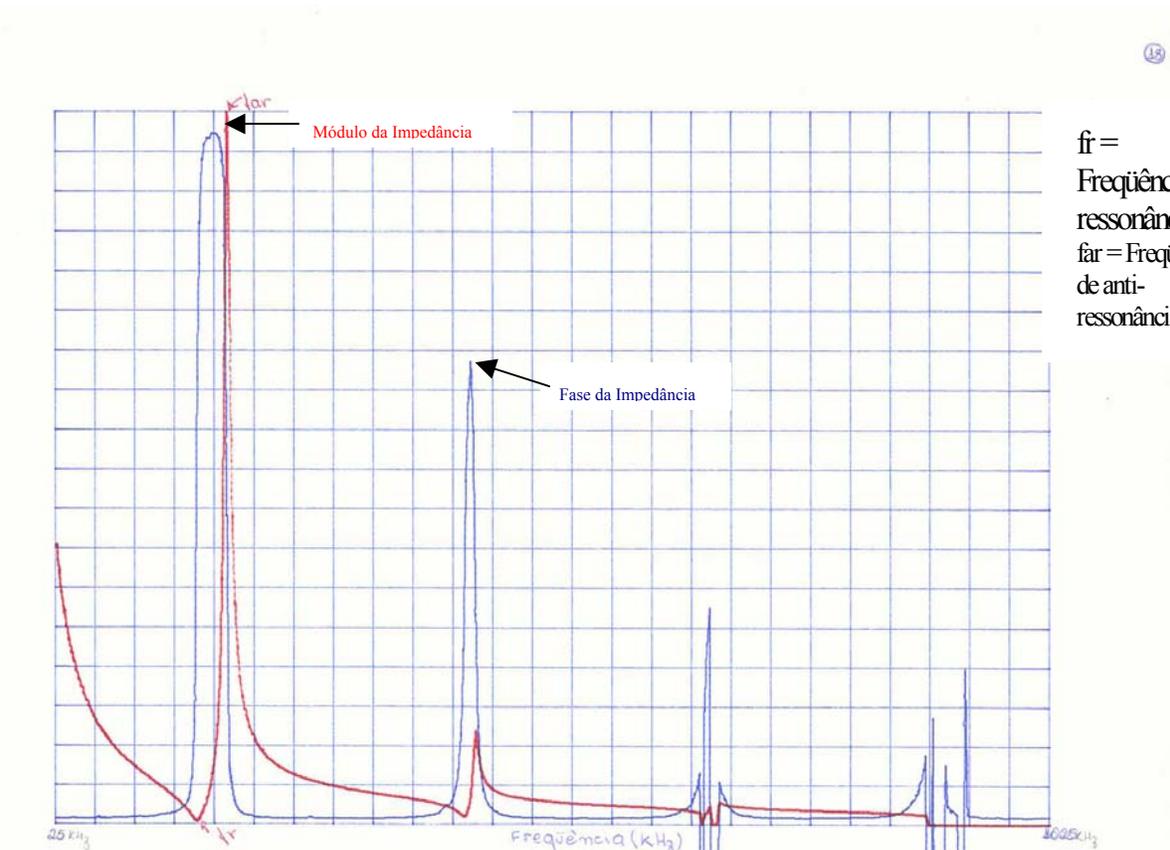
$f_r =$
 Frequência de
 ressonância
 $f_{ar} =$ Frequência
 de anti-
 ressonância

Modo espessura



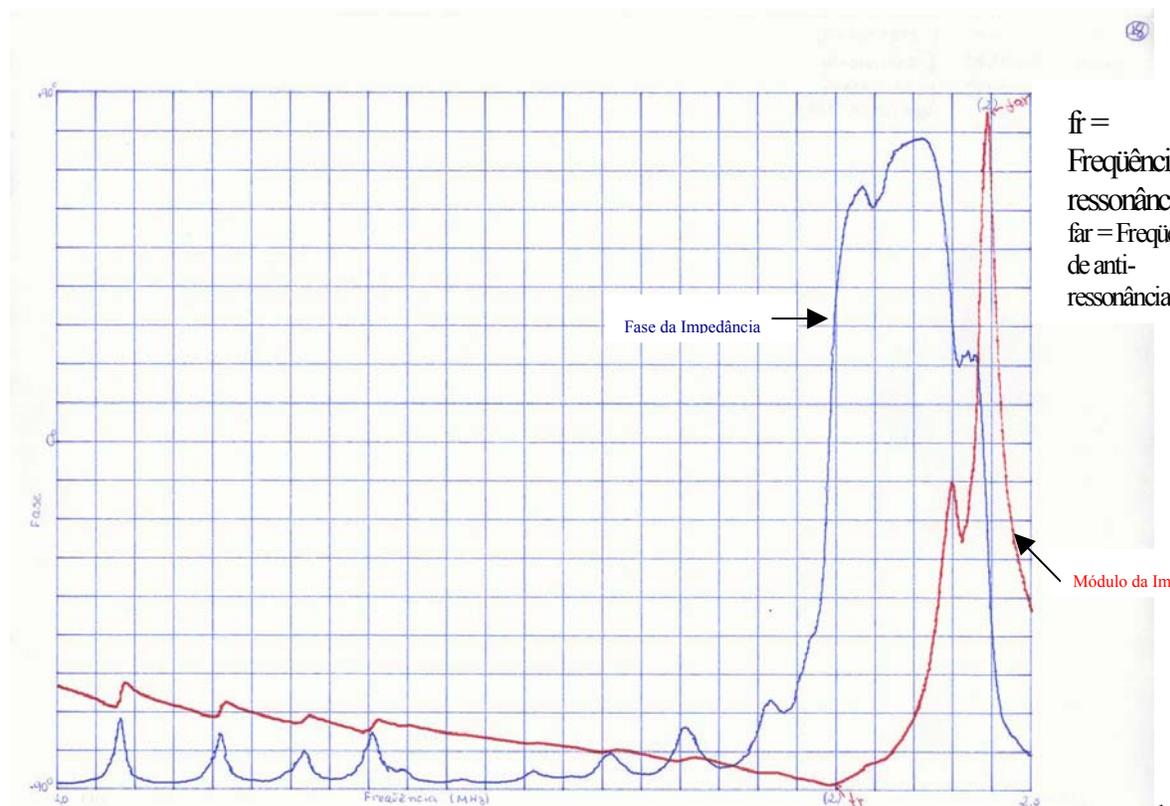
$f_r =$
 Frequência de
 ressonância
 $f_{ar} =$ Frequência
 de anti-
 ressonância

Cerâmica 18
 Modo radial



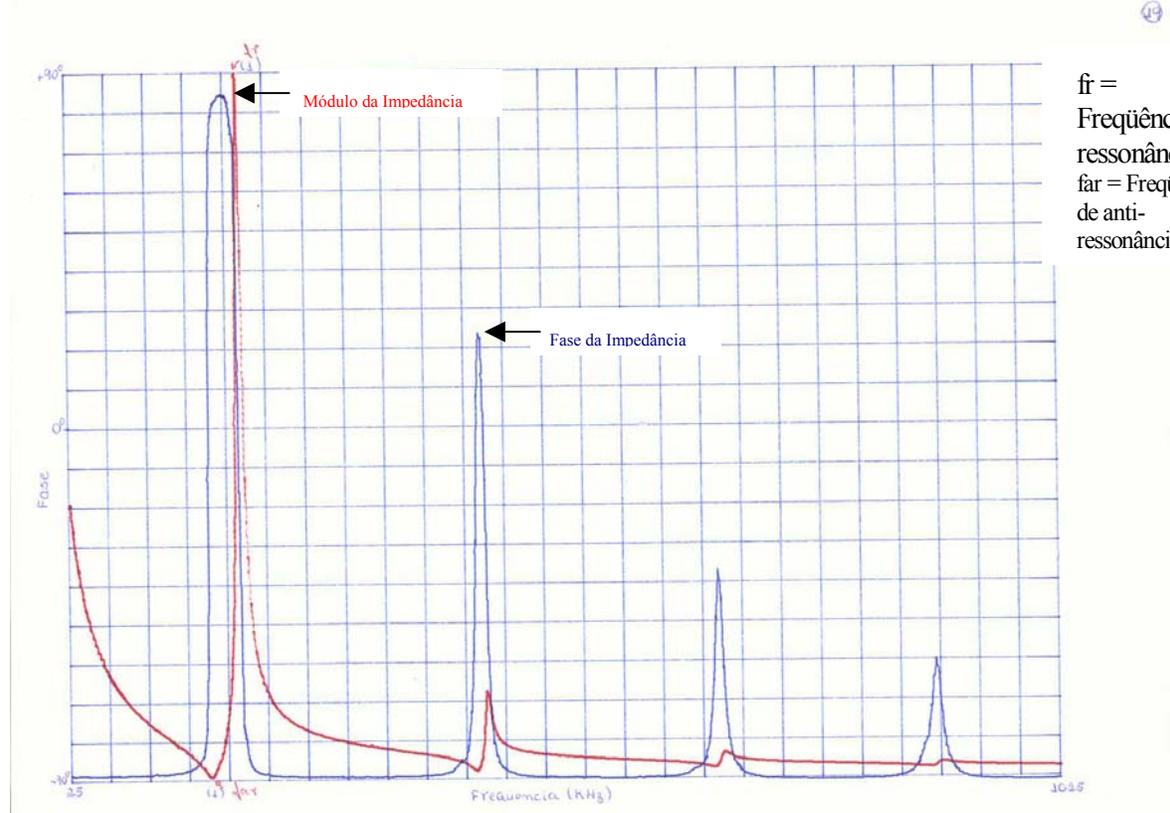
$f_r =$
 Freqüência de
 ressonância
 $f_{ar} =$ Freqüência
 de anti-
 ressonância

Modo espessura



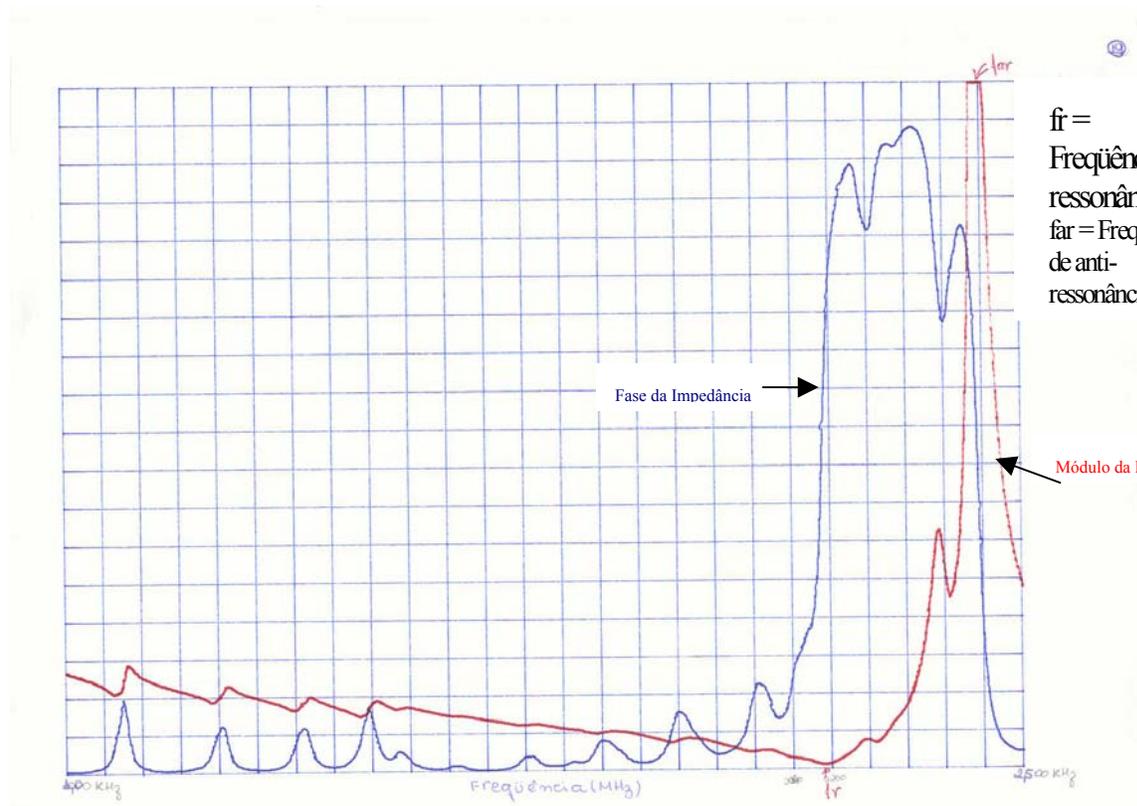
$f_r =$
 Freqüência de
 ressonância
 $f_{ar} =$ Freqüência
 de anti-
 ressonância

Cerâmica 19
 Modo radial



$f_r =$
 Frequência de
 ressonância
 $f_{ar} =$ Frequência
 de anti-
 ressonância

Modo espessura



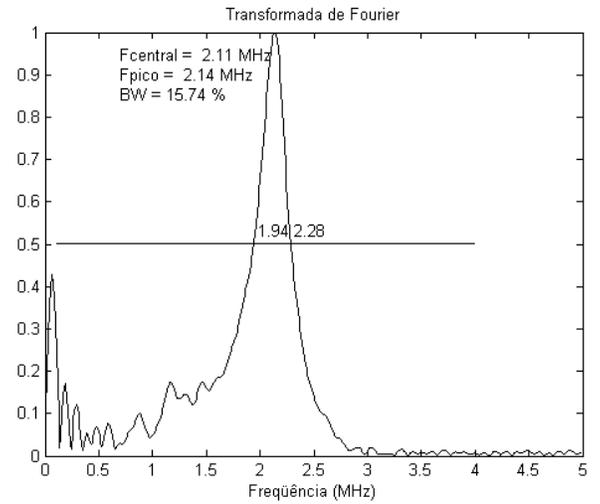
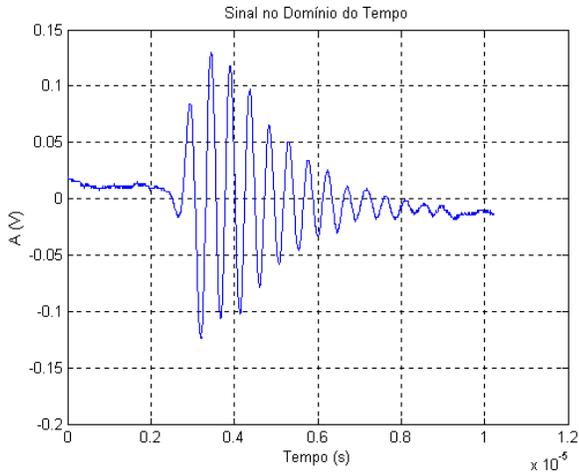
$f_r =$
 Frequência de
 ressonância
 $f_{ar} =$ Frequência
 de anti-
 ressonância

Apêndice B

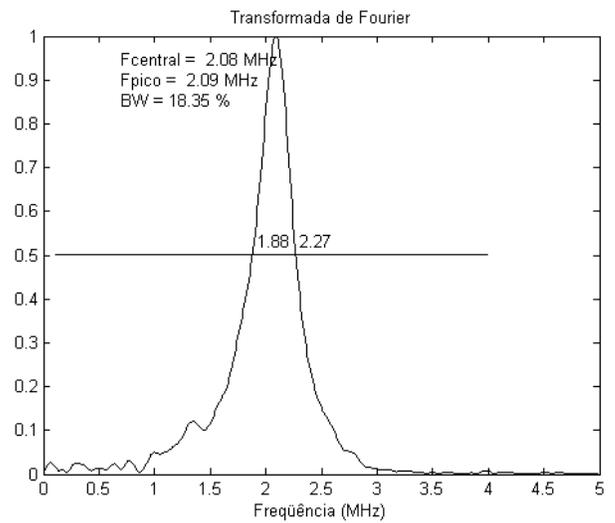
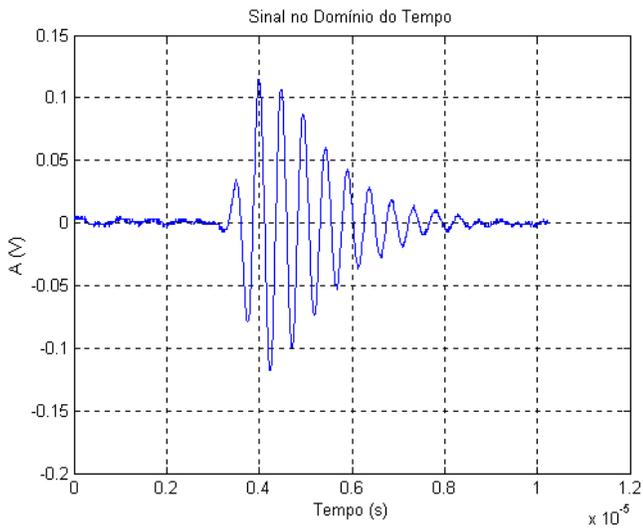
BW dos transdutores com e sem indutor com pulso quadrado negativo de -66 V

Transdutor #2

sem indutor

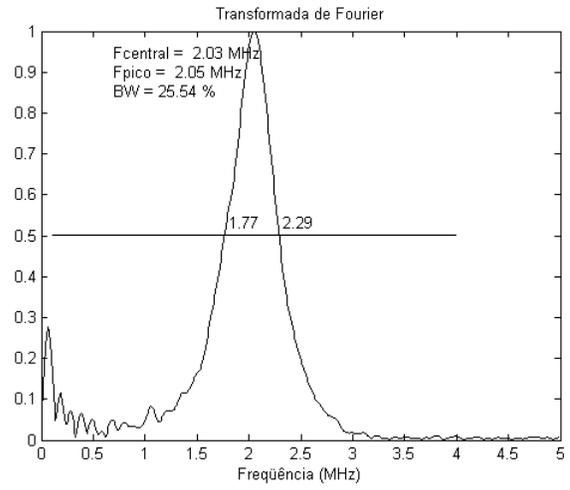
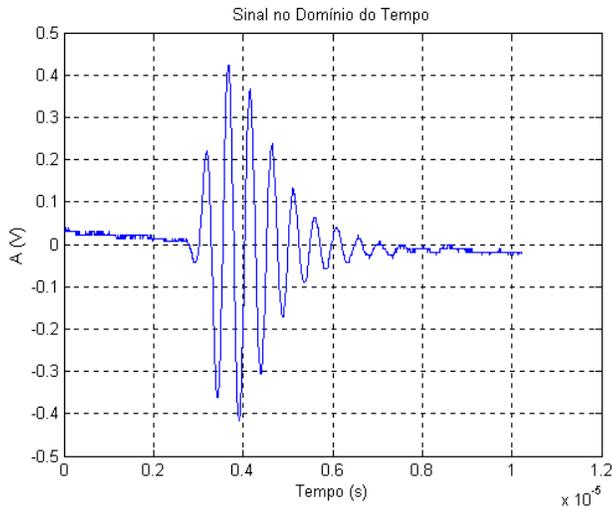


Com indutor

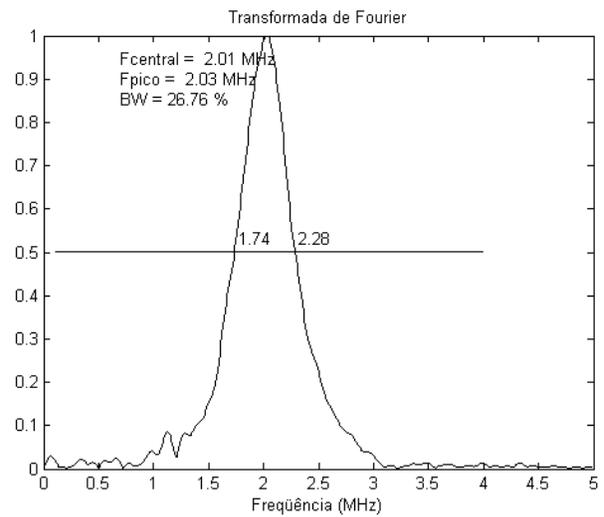
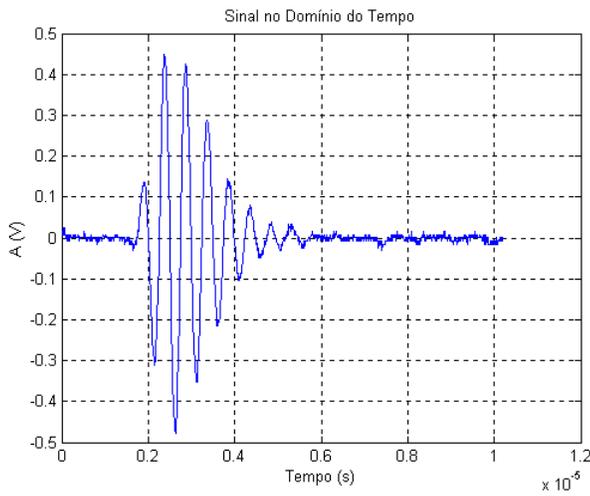


Transdutor #4

Sem indutor

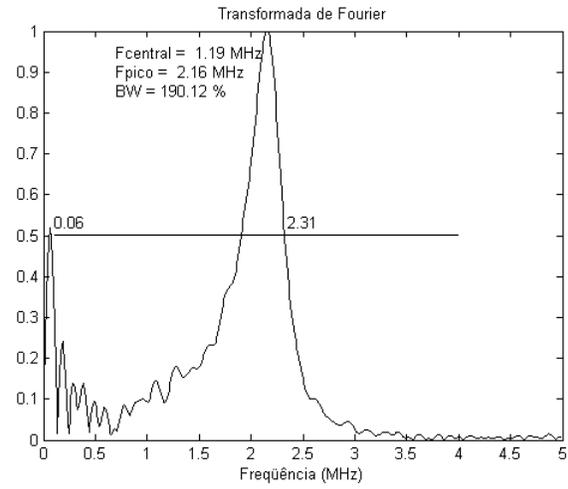
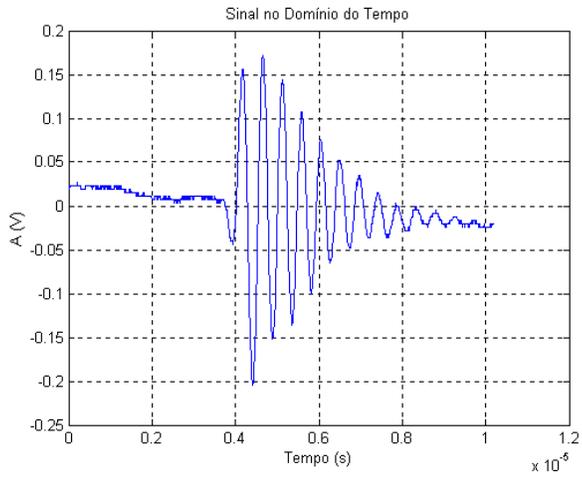


Com indutor

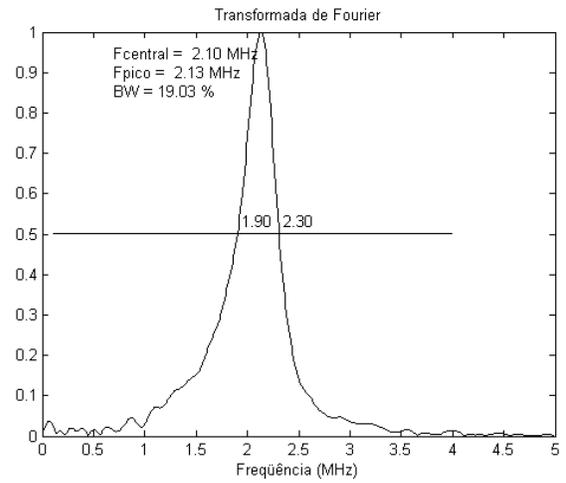
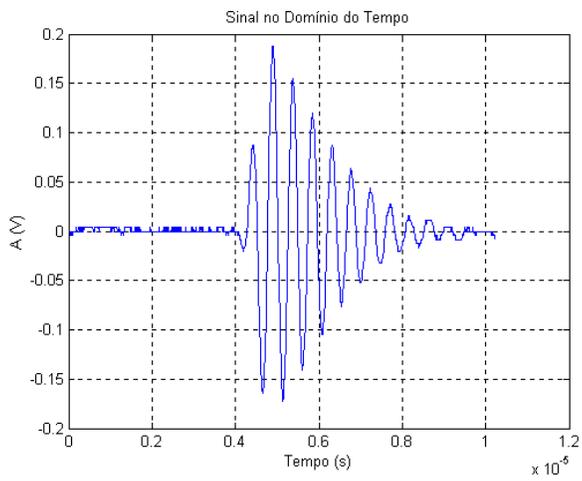


Transdutor #5

Sem indutor

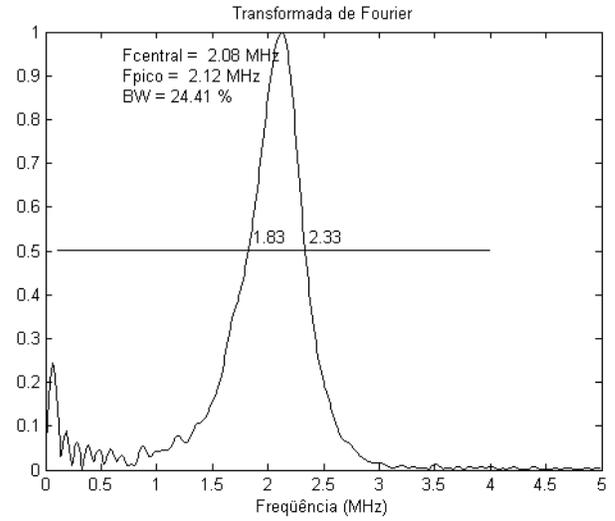
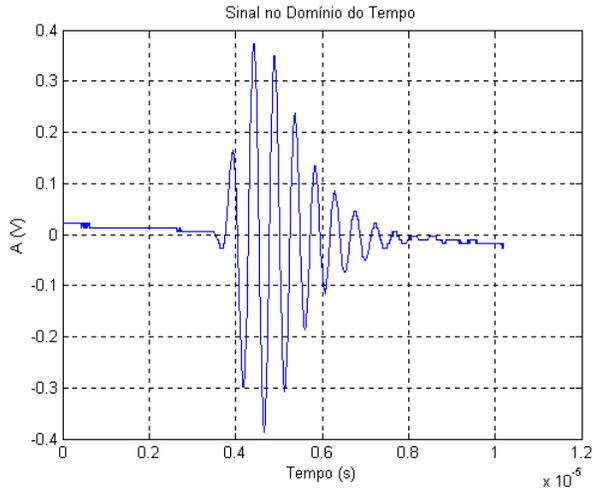


Com indutor

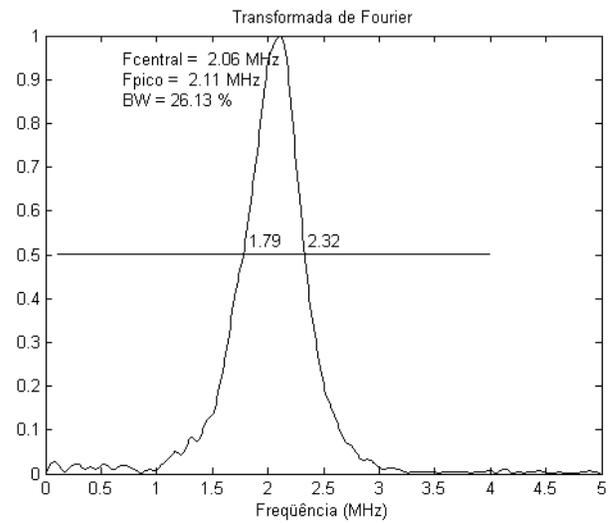
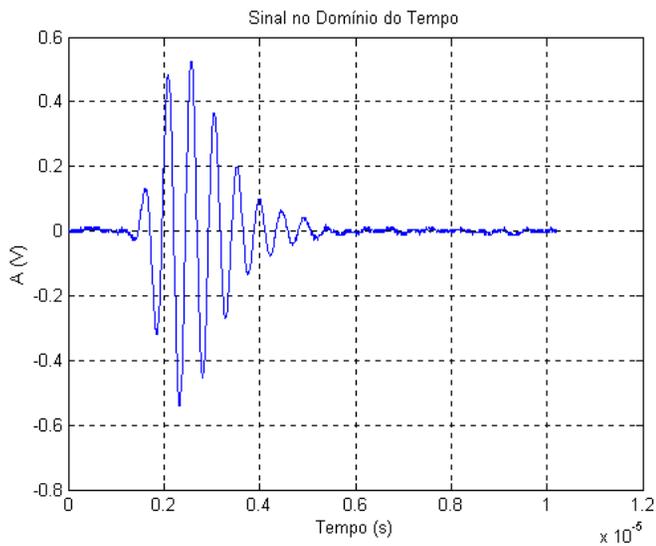


Transdutor #6

Sem indutor

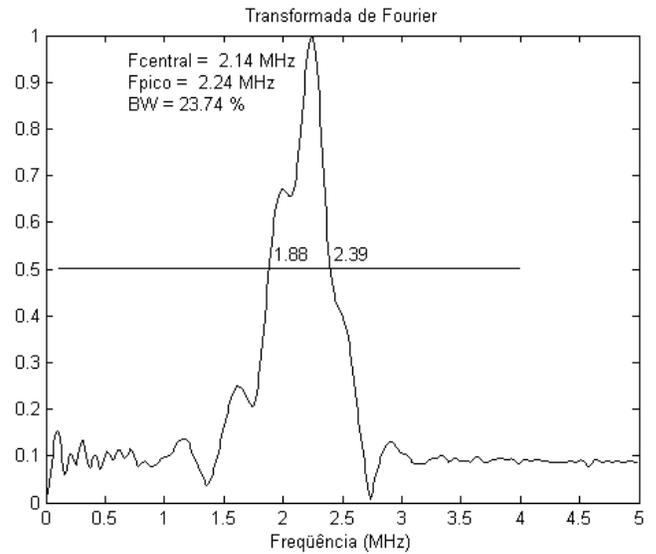
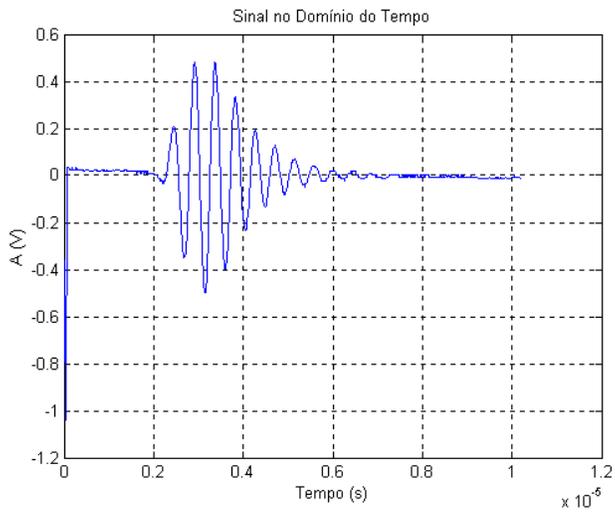


Com indutor

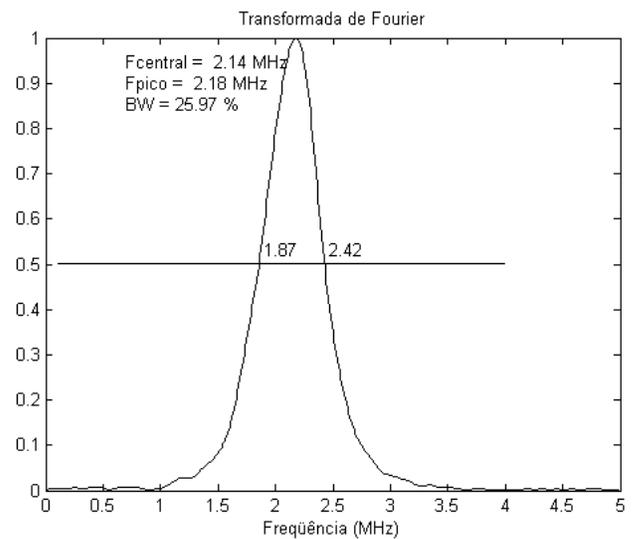
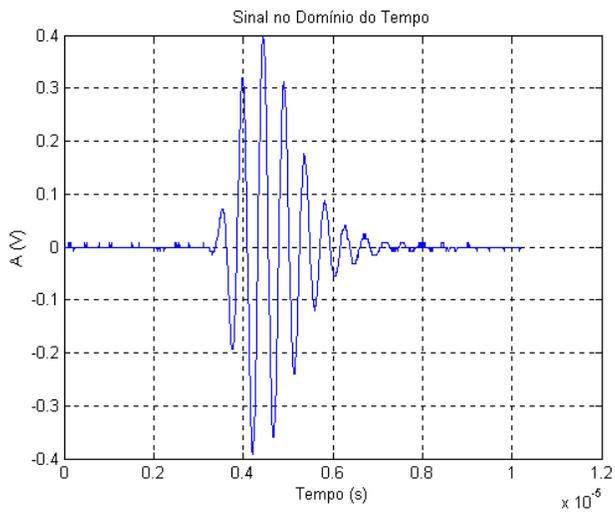


Transdutor #8

Sem indutor

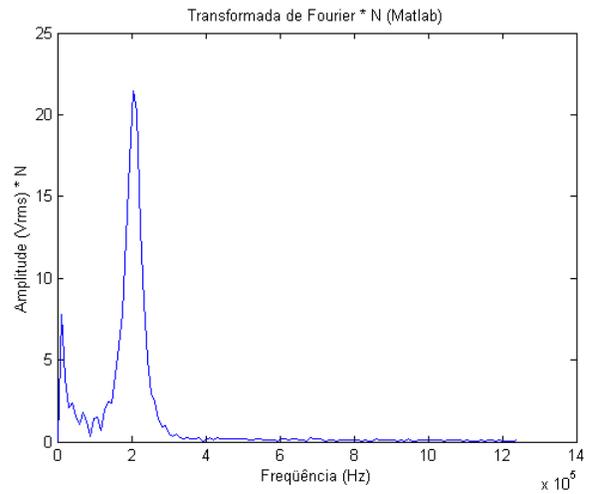
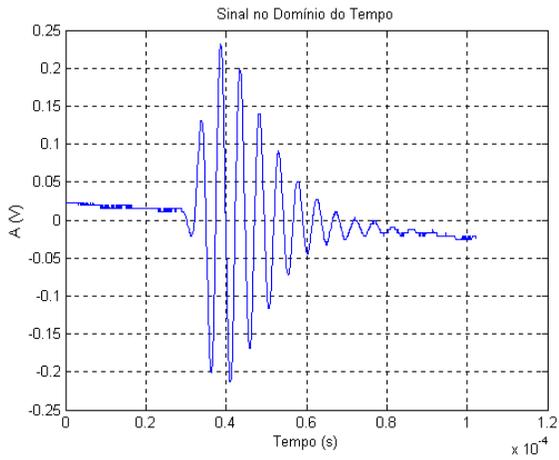


Com indutor

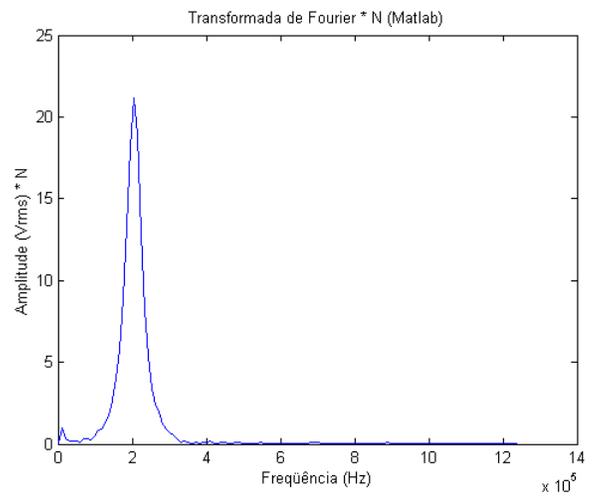
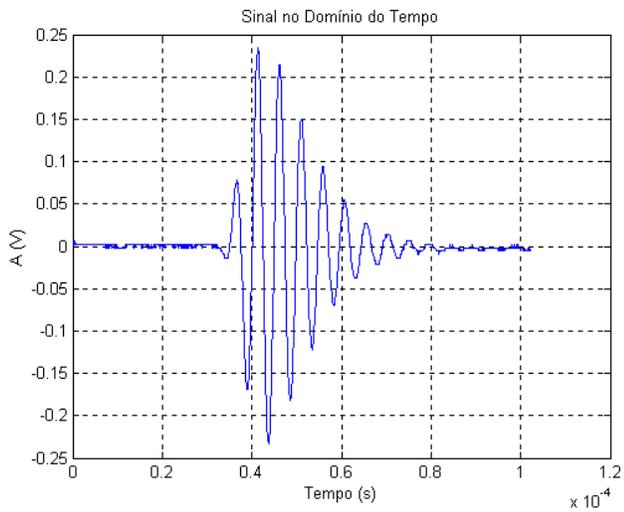


Transdutor #10

Sem indutor

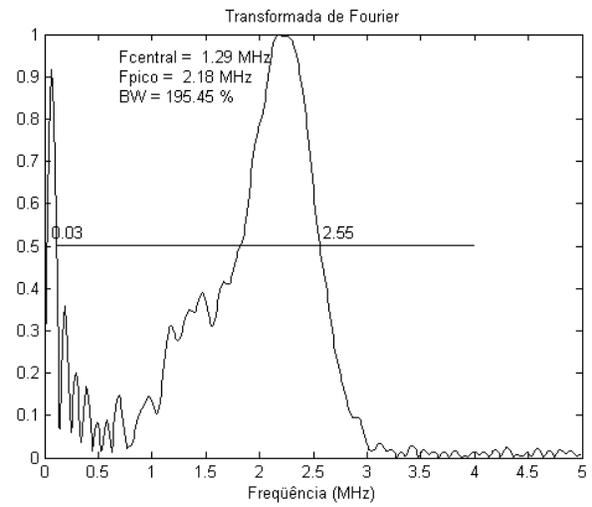
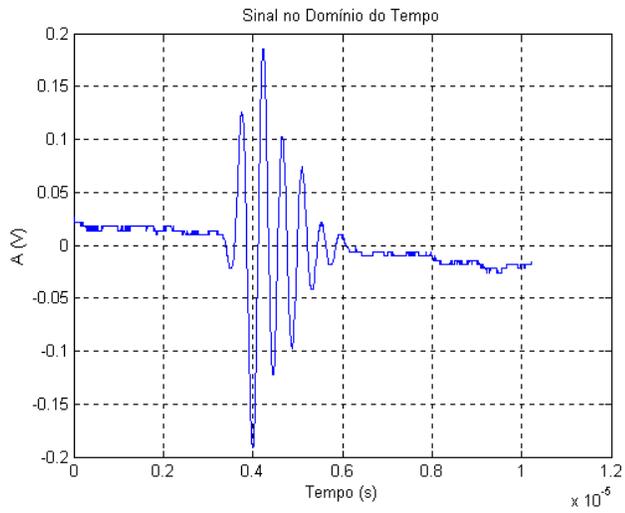


Com indutor

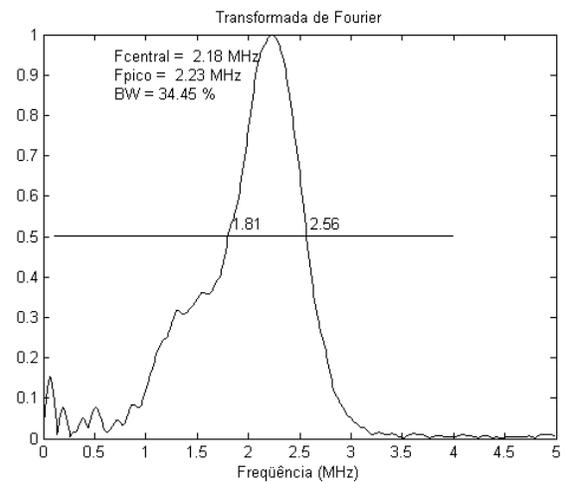
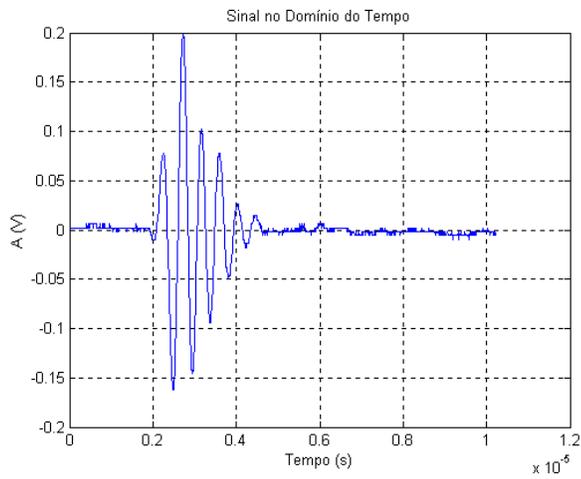


Transdutor #14

Sem indutor

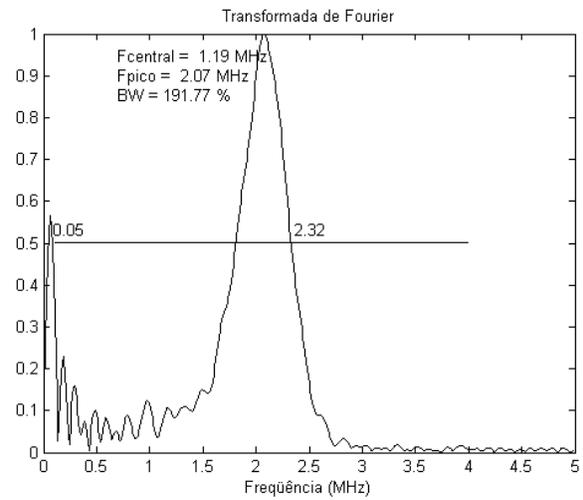
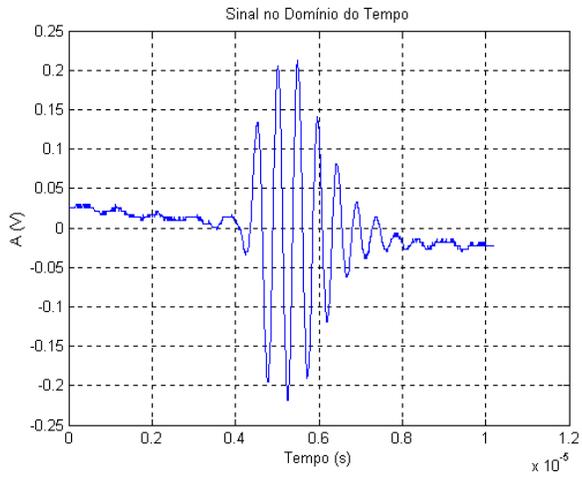


Com indutor

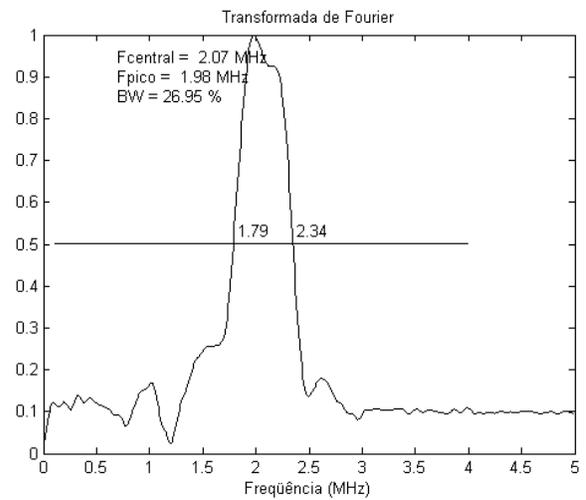
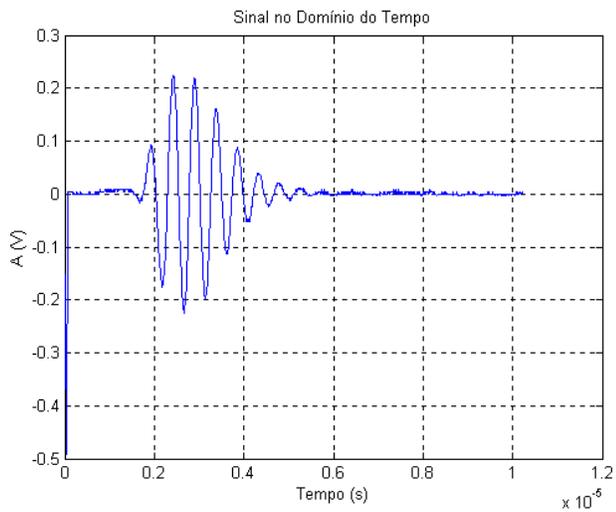


Transdutor #15

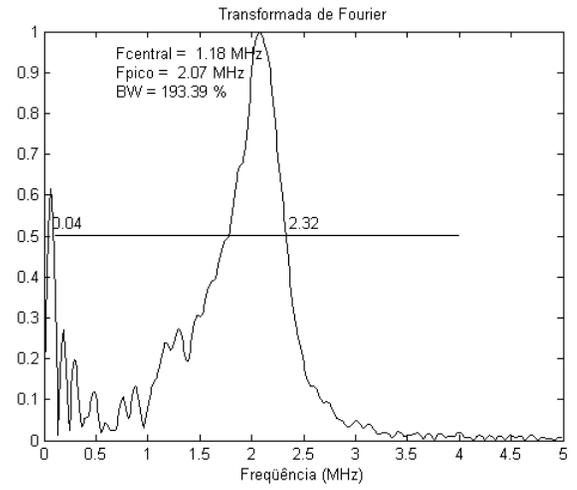
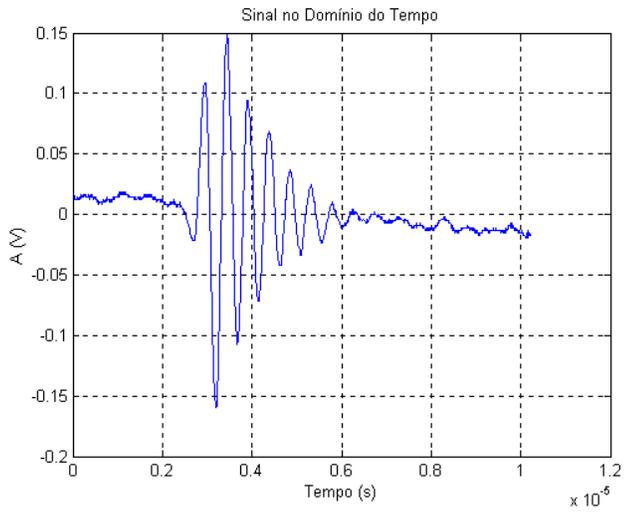
Sem indutor



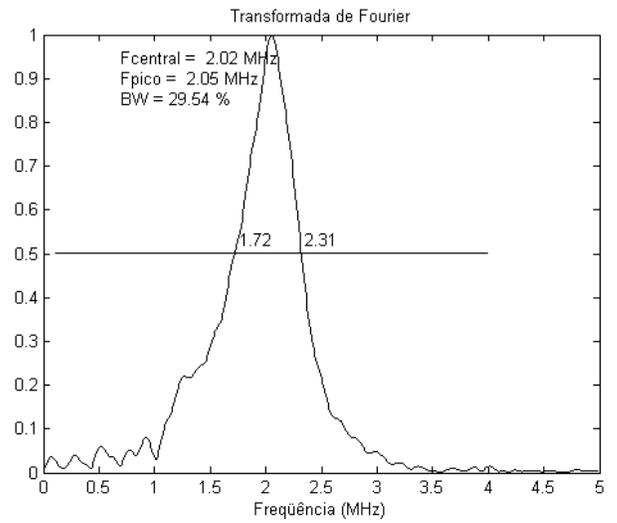
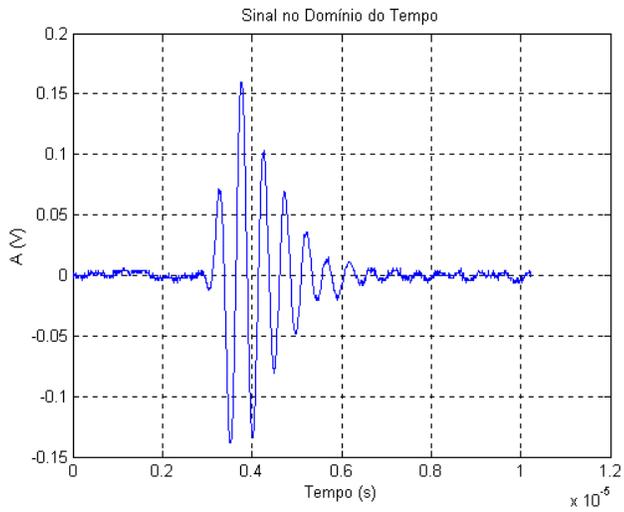
Com indutor



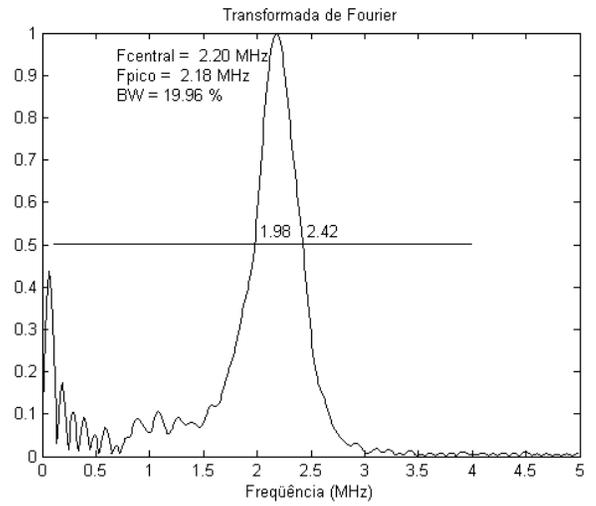
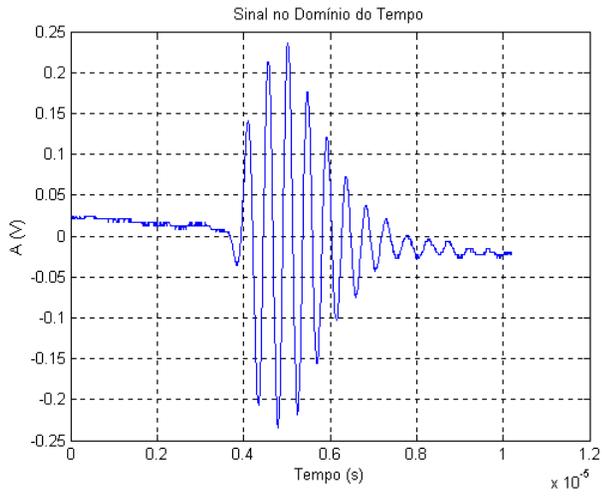
Transdutor #16 Sem indutor



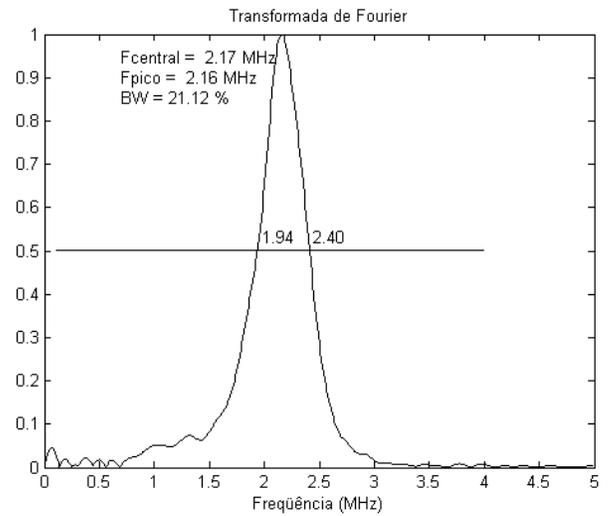
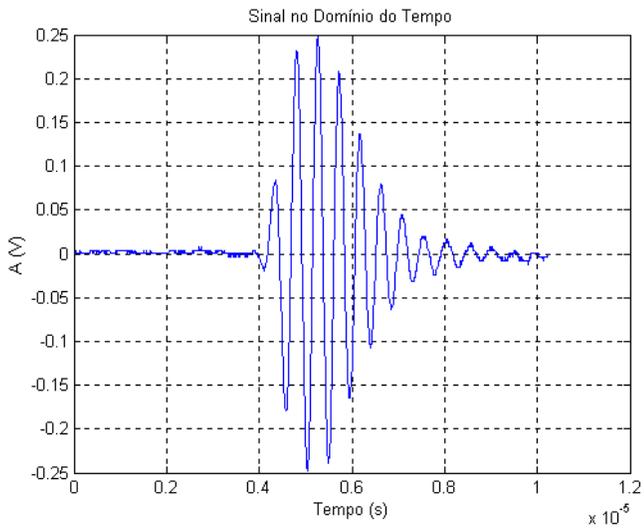
Com indutor



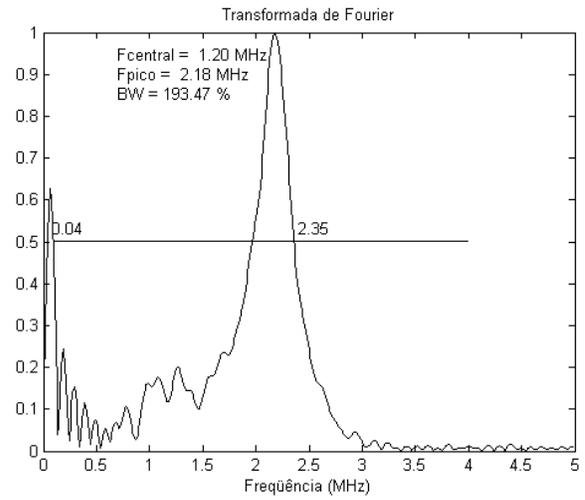
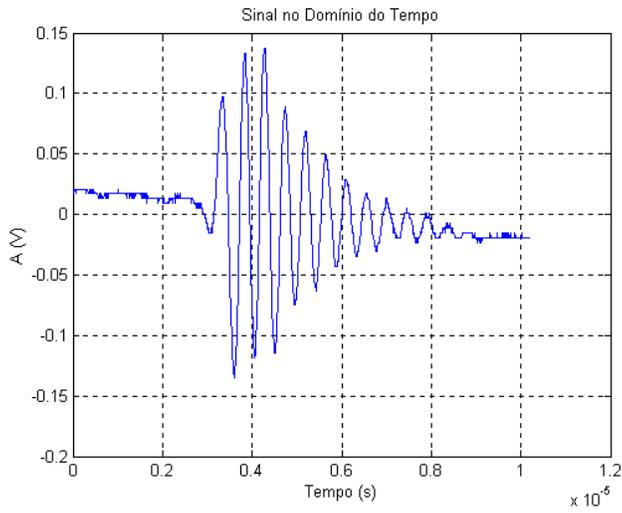
Transdutor #18 Sem indutor



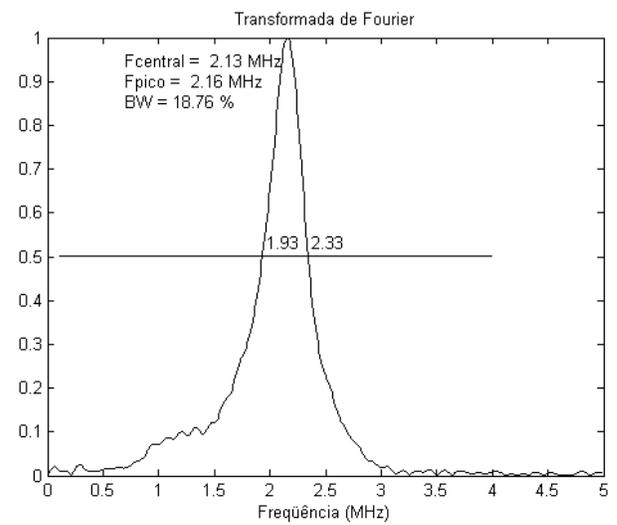
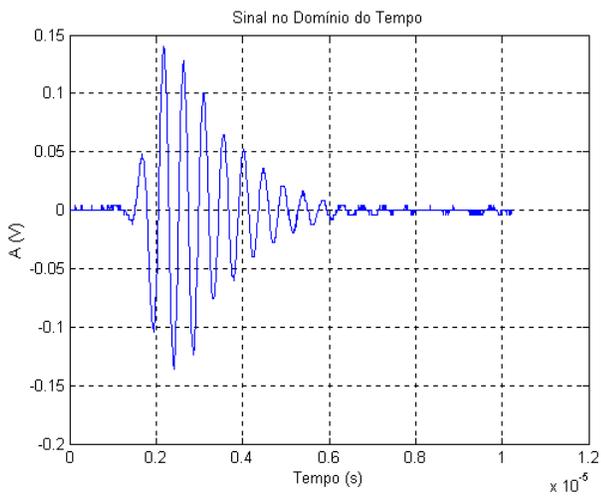
Com indutor



Transdutor #19 Sem indutor

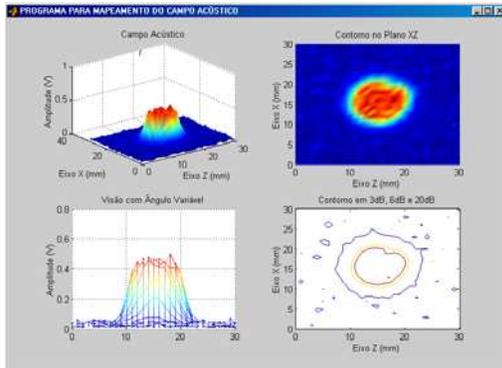


Com indutor

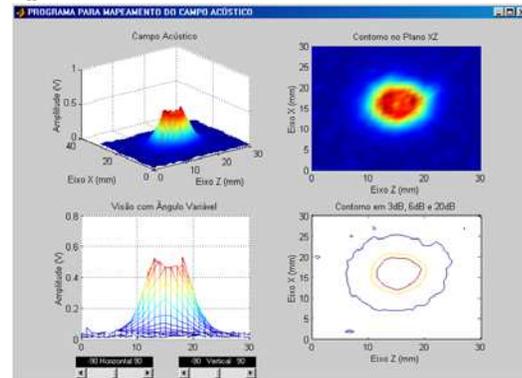


Apêndice C – Mapeamento dos transdutores no plano XZ

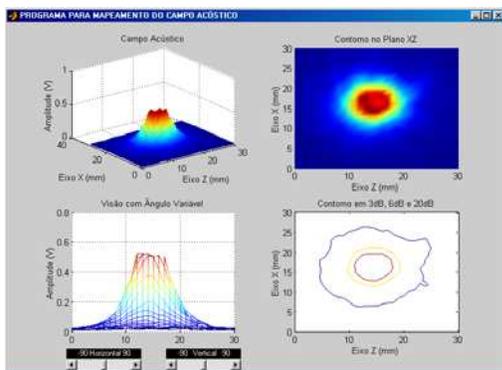
Transdutor #2
Área ativa



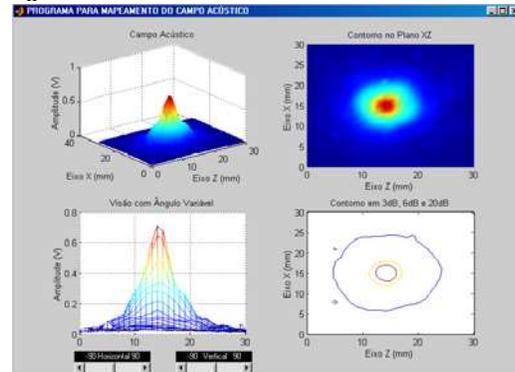
$z_n/3$



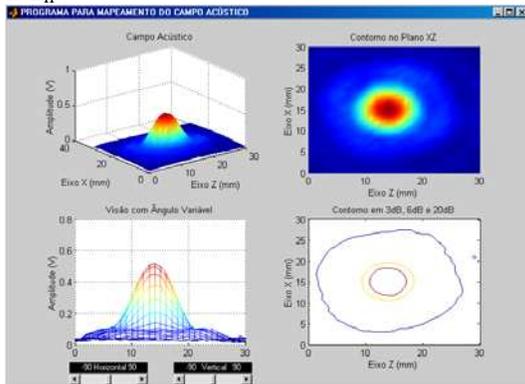
$z_n/2$



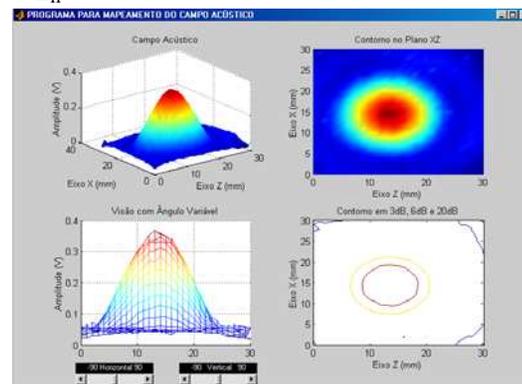
z_n



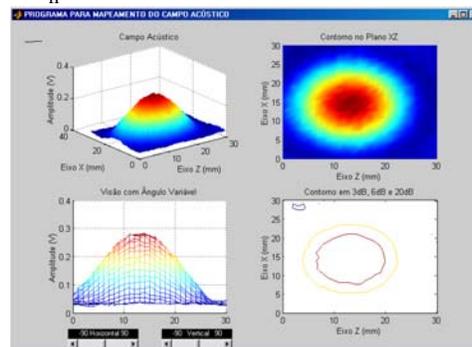
$2 z_n$



$3 z_n$

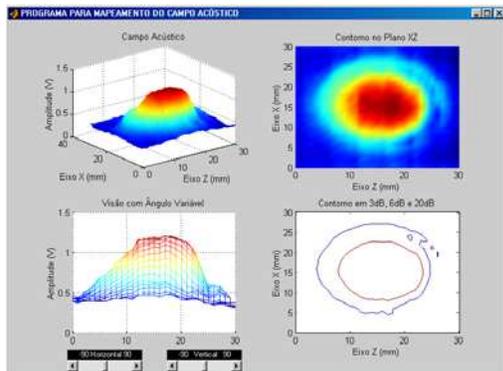


$4 z_n$

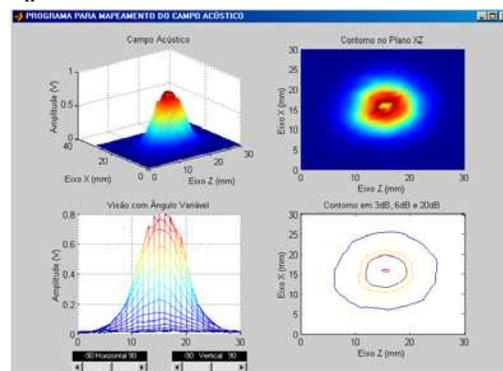


Transdutor #4

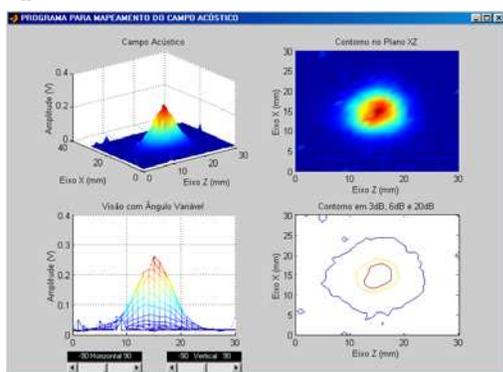
Área ativa



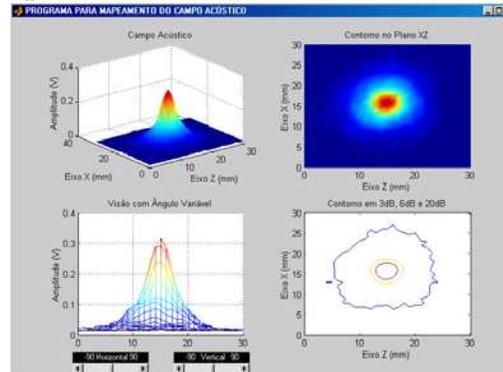
z_n/3



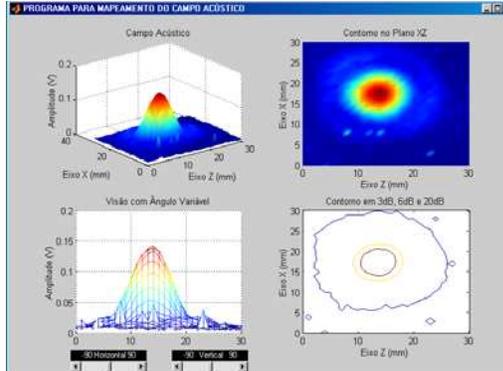
z_n/2



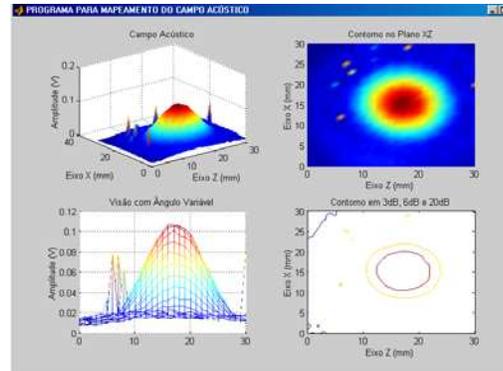
z_n



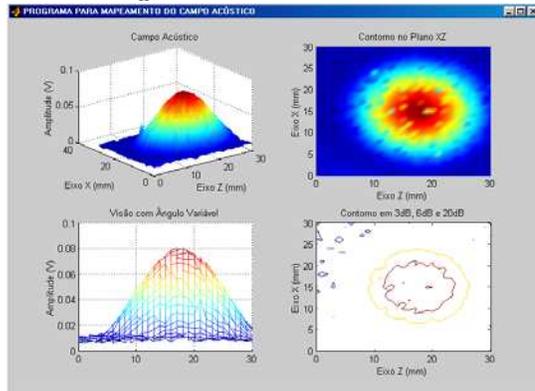
2 z_n



3 z_n

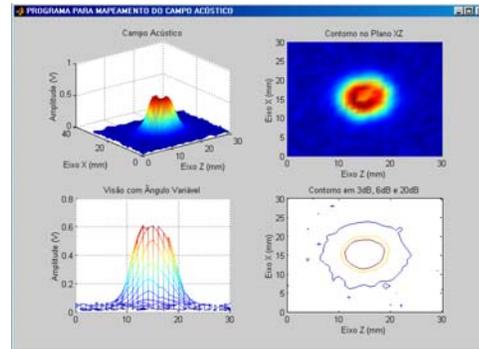
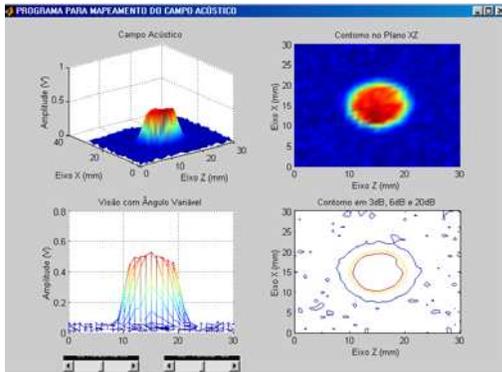


4 z_n

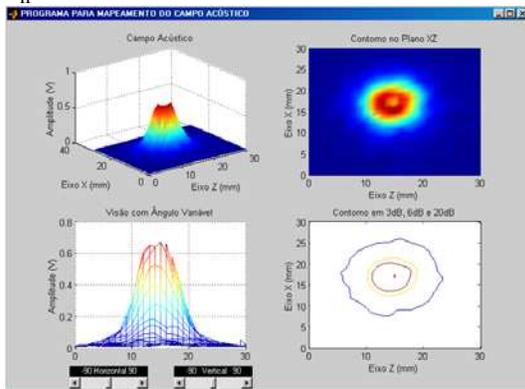


Transdutor #5
Área ativa

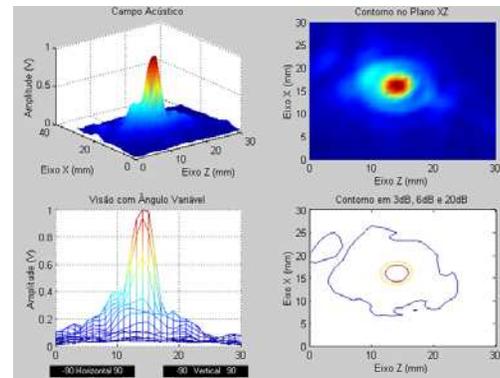
$z_n/3$



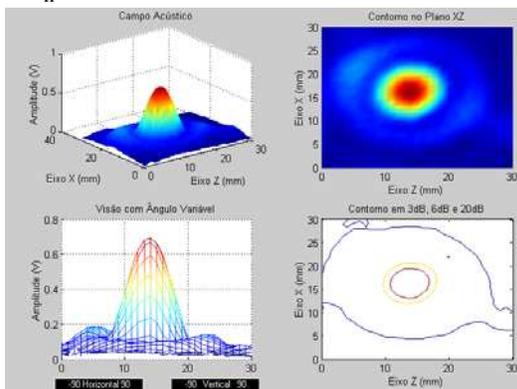
$z_n/2$



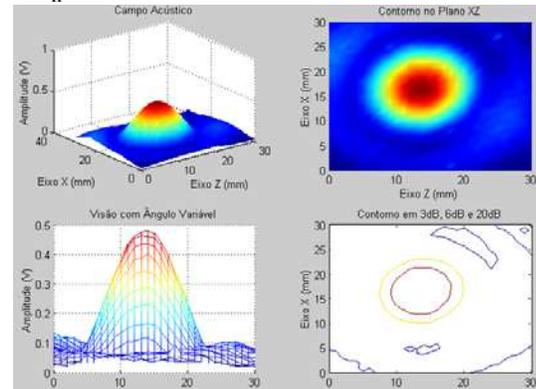
z_n



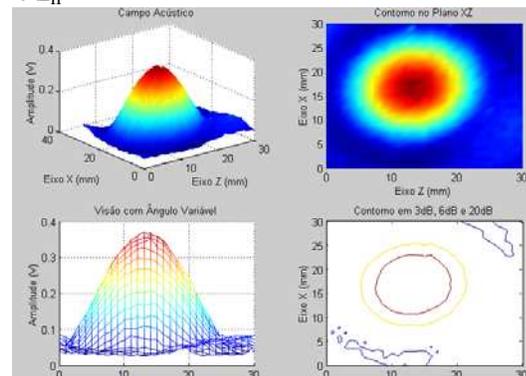
$2 z_n$



$3 z_n$



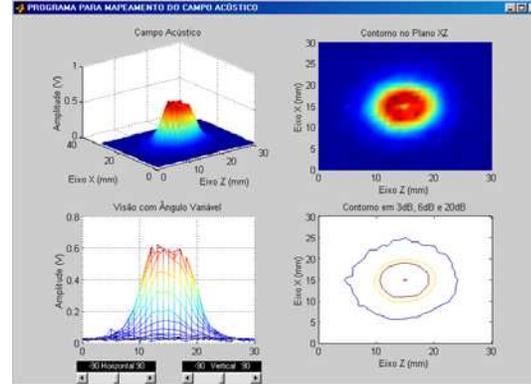
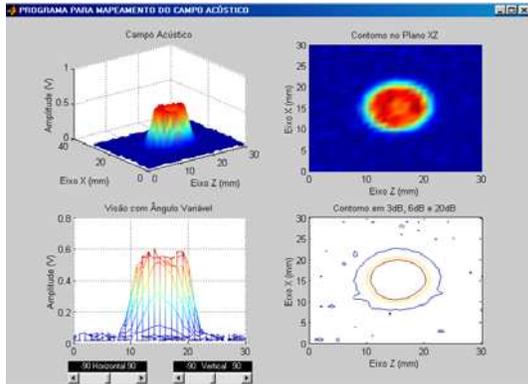
$4 z_n$



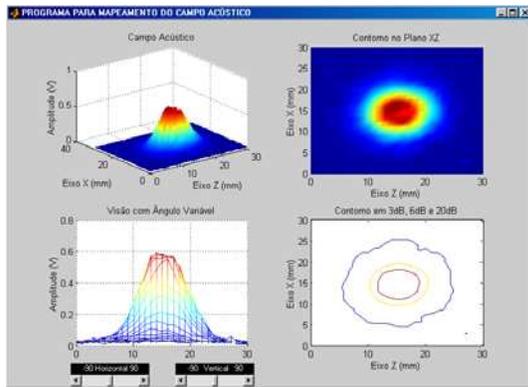
Transdutor #6

Área ativa

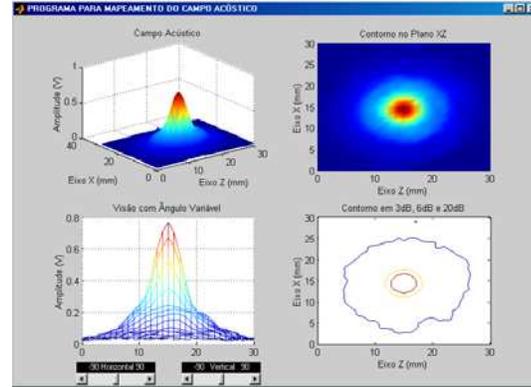
$z_n/3$



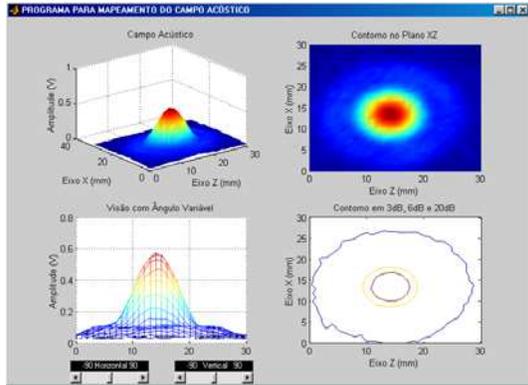
$z_n/2$



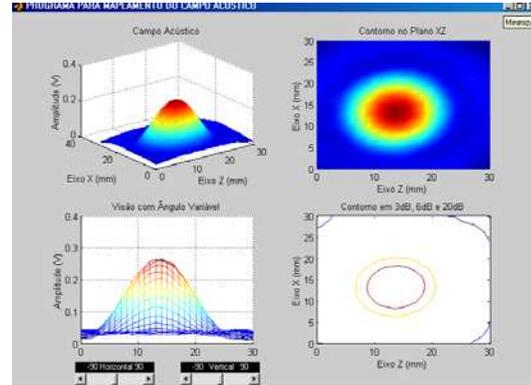
z_n



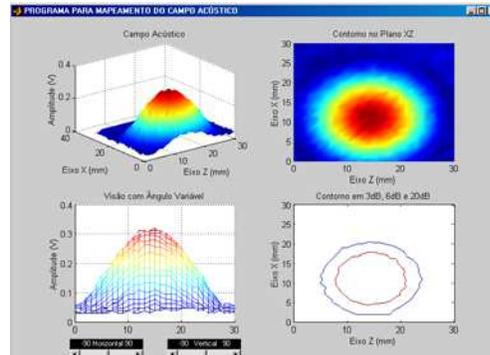
$2 z_n$



$3 z_n$

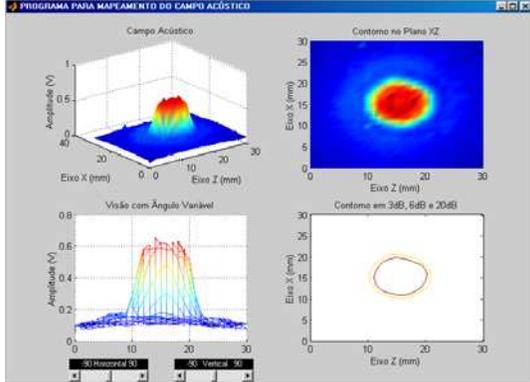


$4 z_n$

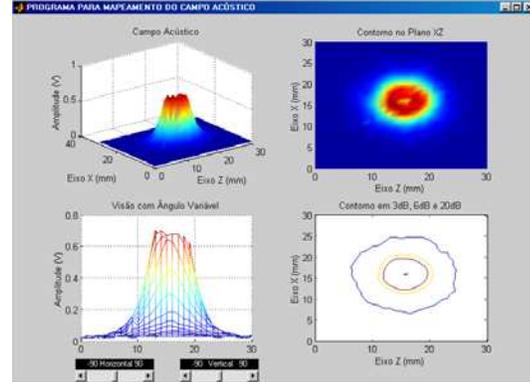


Transdutor #8

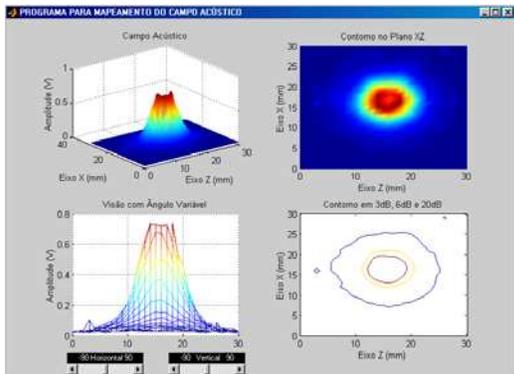
Área ativa



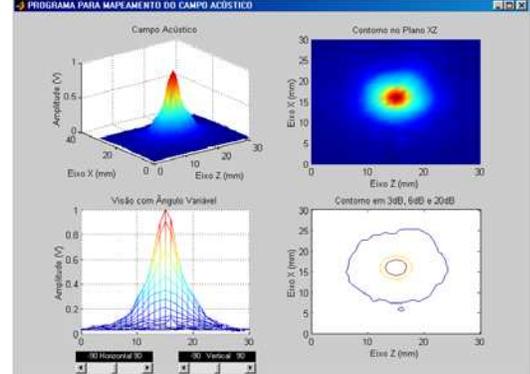
$z_n/3$



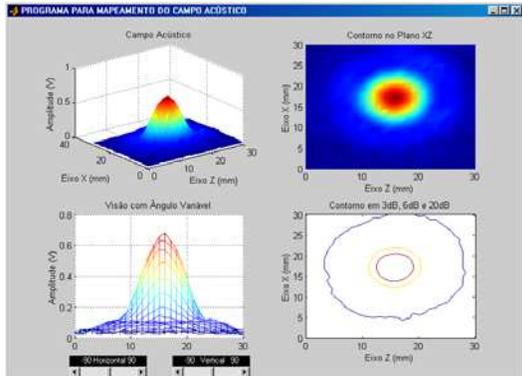
$z_n/2$



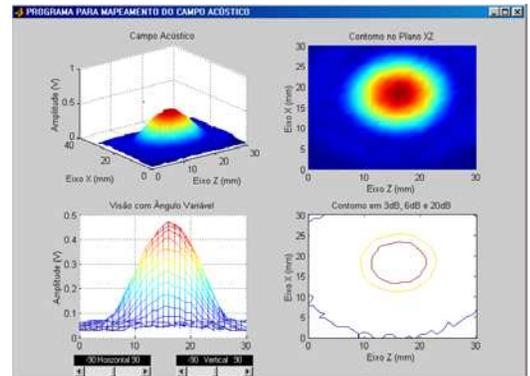
z_n



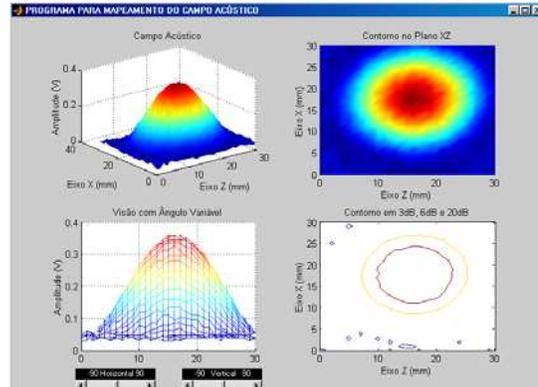
$2 z_n$



$3 z_n$

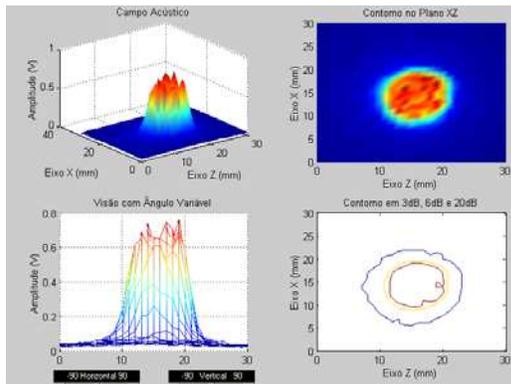


$4 z_n$

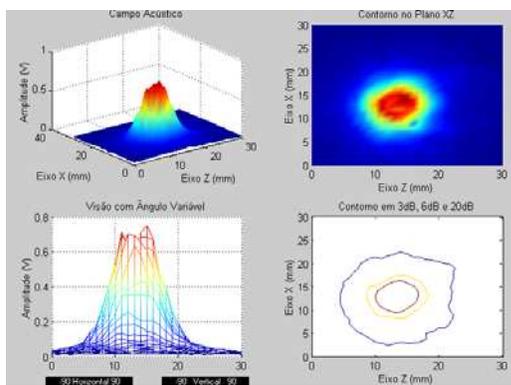


Transdutor #10

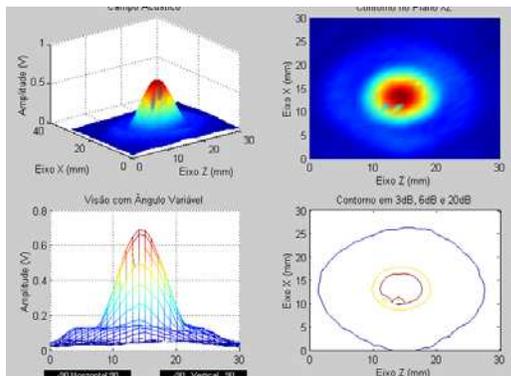
Área ativa



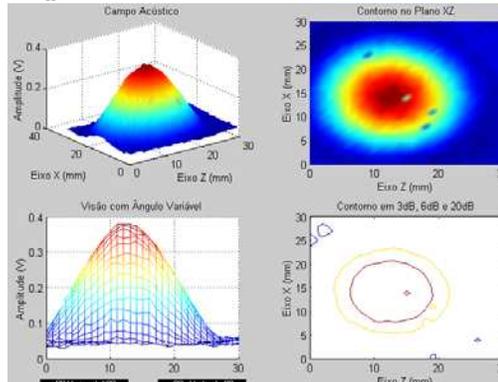
$z_n/2$



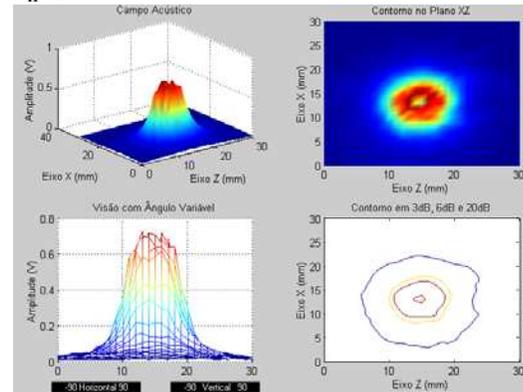
$2 z_n$



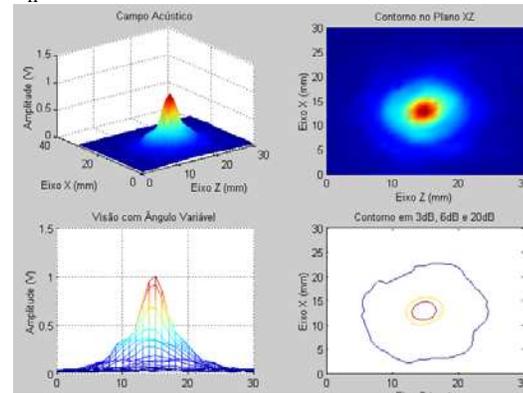
$4 z_n$



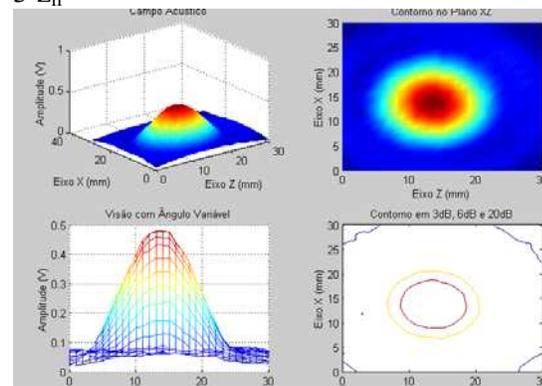
$z_n/3$



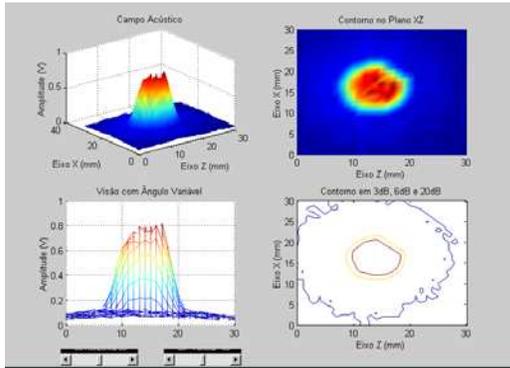
z_n



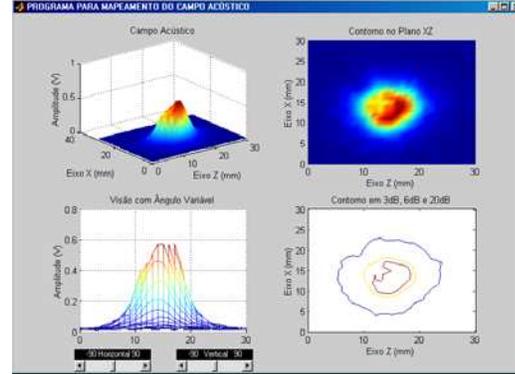
$3 z_n$



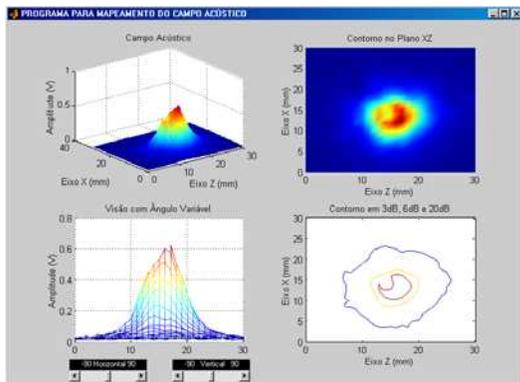
Transdutor #14
Área ativa



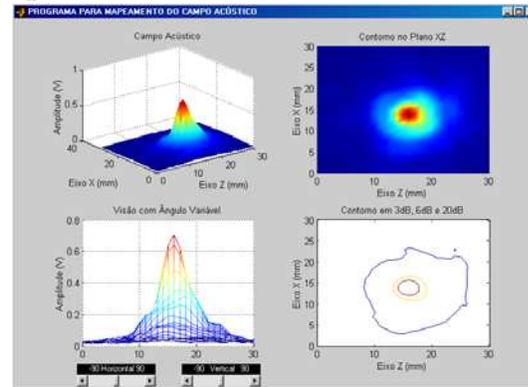
$z_n/3$



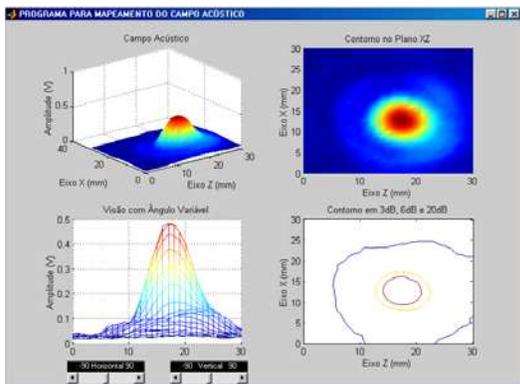
$z_n/2$



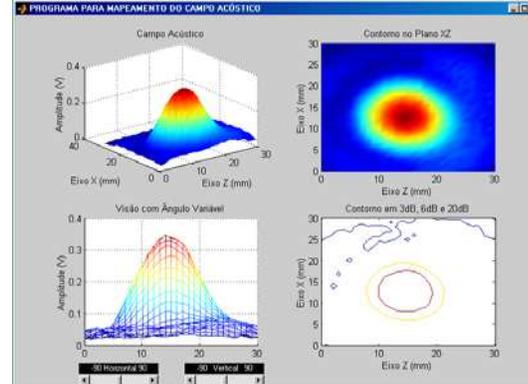
z_n



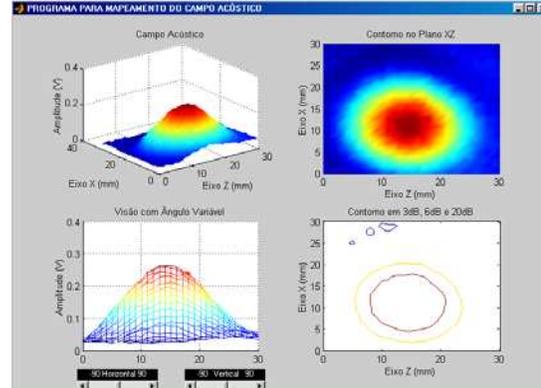
$2 z_n$



$3 z_n$



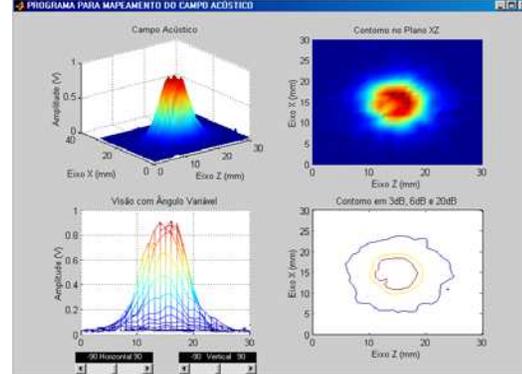
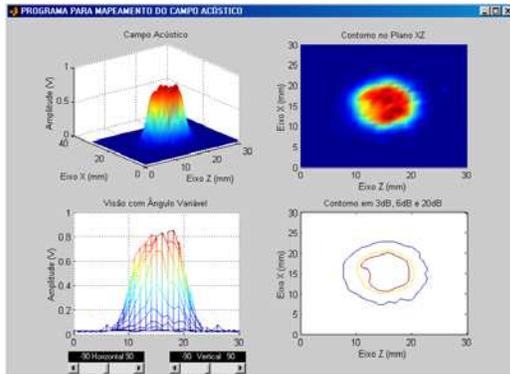
$4 z_n$



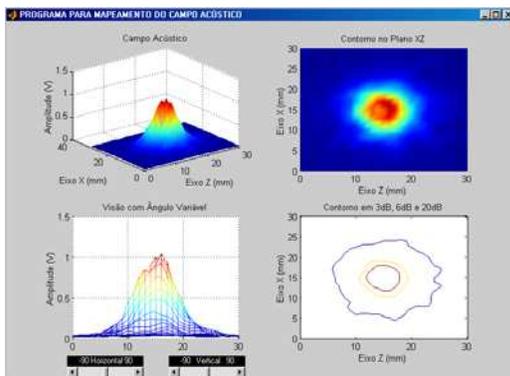
Transdutor #15

Área ativa

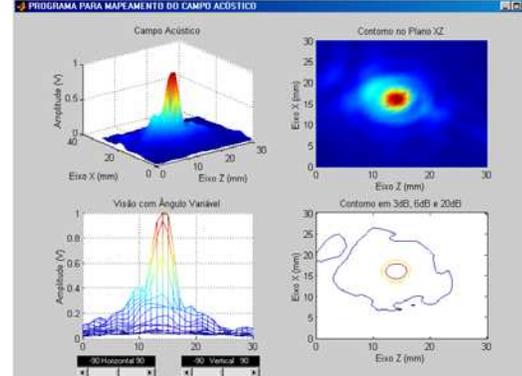
$z_n/3$



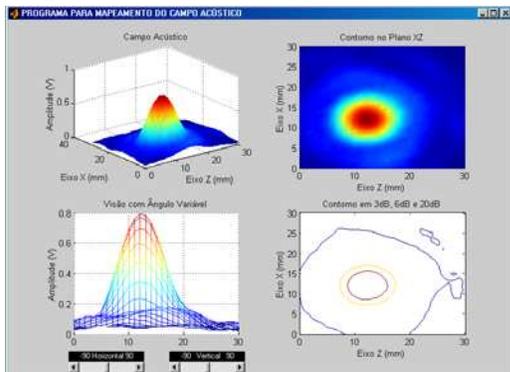
$z_n/2$



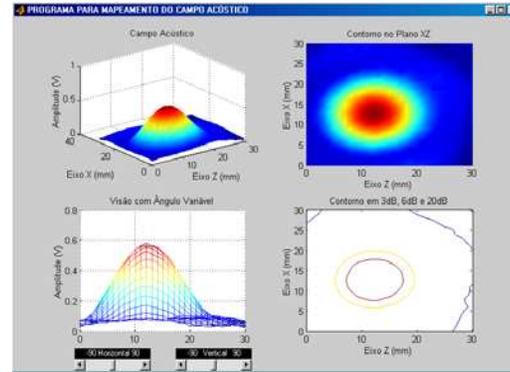
z_n



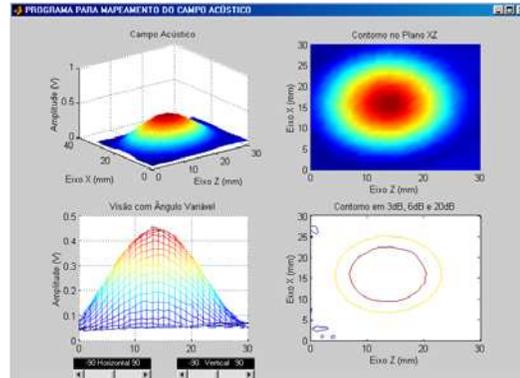
$2 z_n$



$3 z_n$

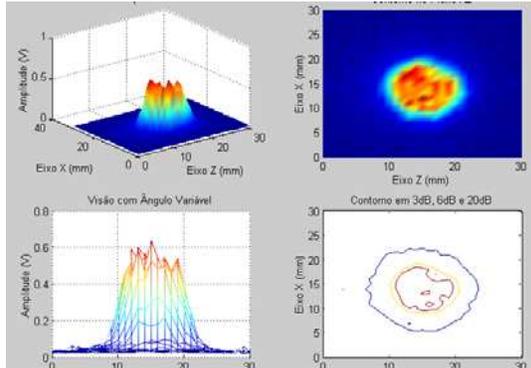


$4 z_n$

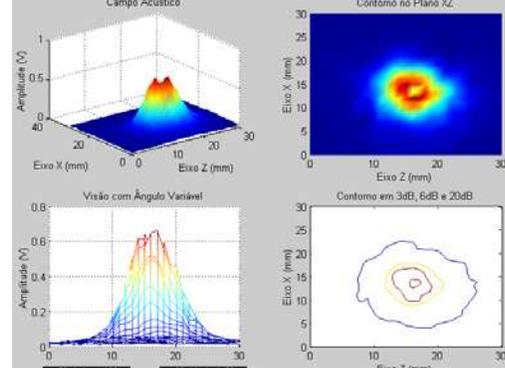


Transdutor #16

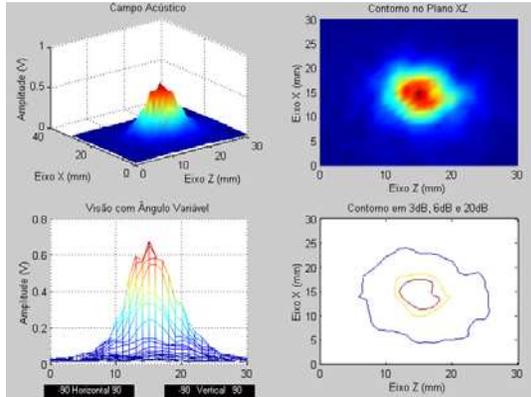
Área ativa



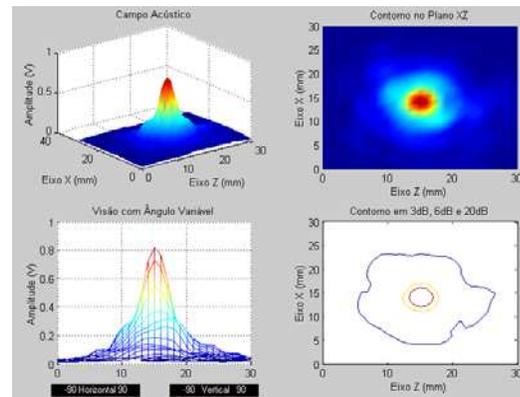
$z_n/3$



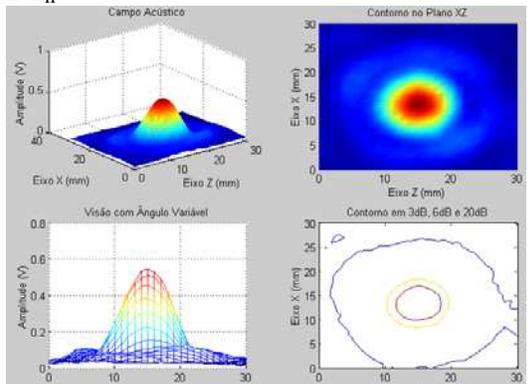
$z_n/2$



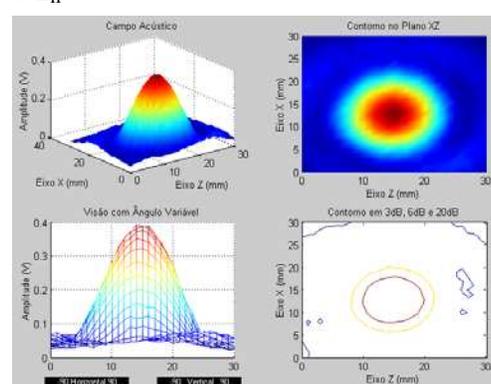
z_n



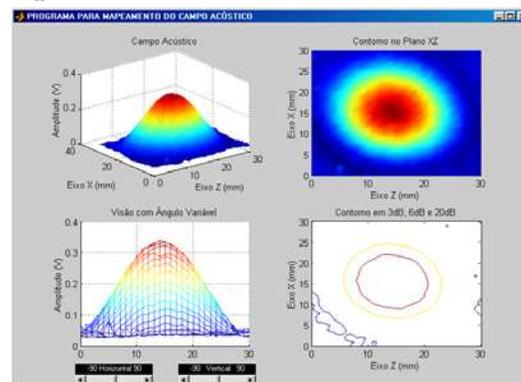
$2 z_n$



$3 z_n$

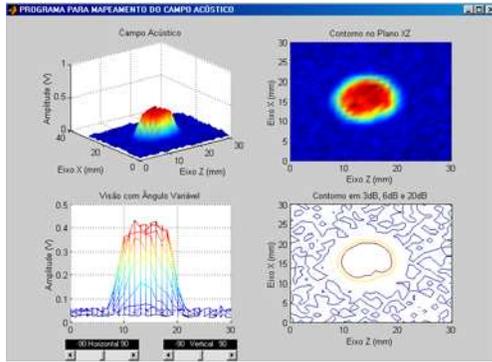


$4 z_n$

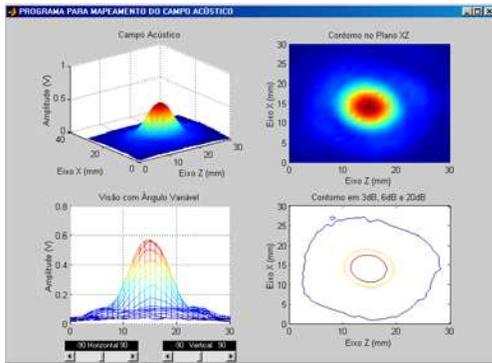


Transdutor #18

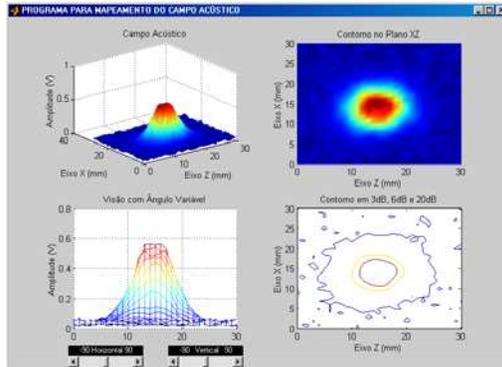
Área ativa



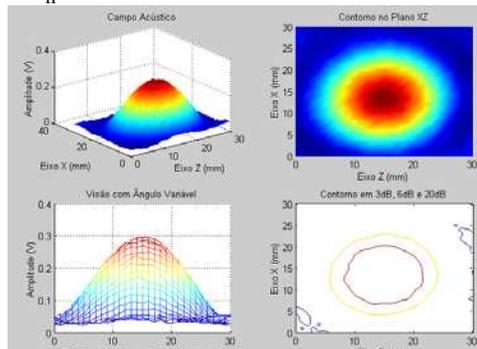
$z_n/2$



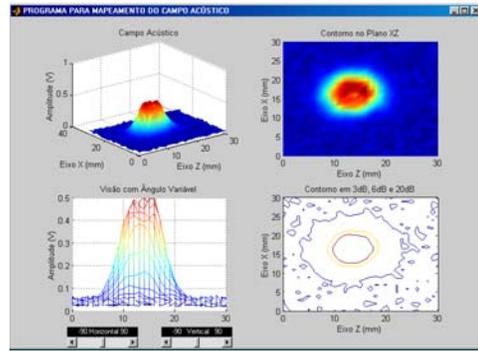
$2 z_n$



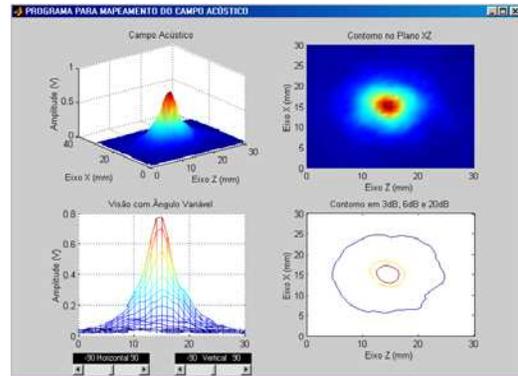
$4 z_n$



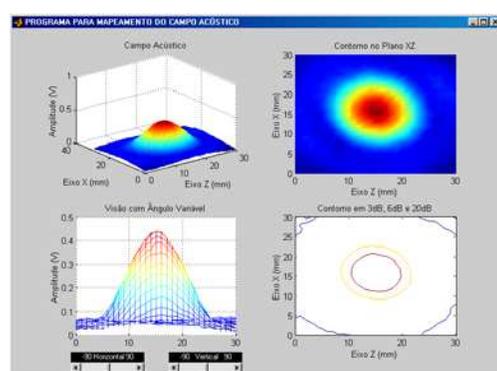
$z_n/3$



z_n

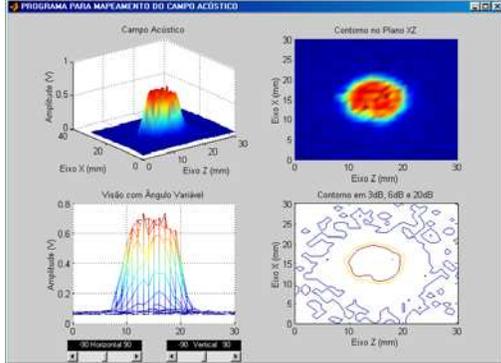


$3 z_n$

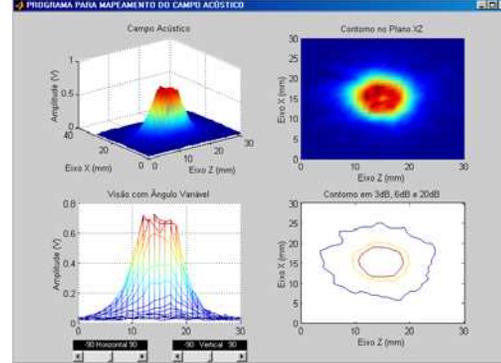


Transdutor #19

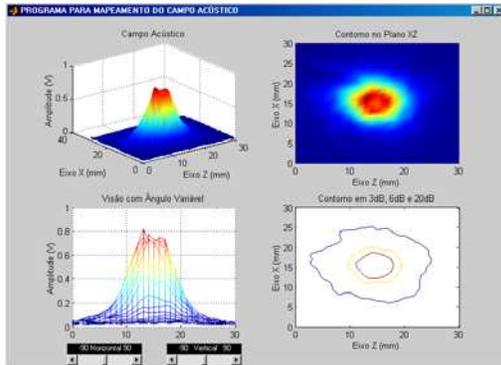
Área ativa



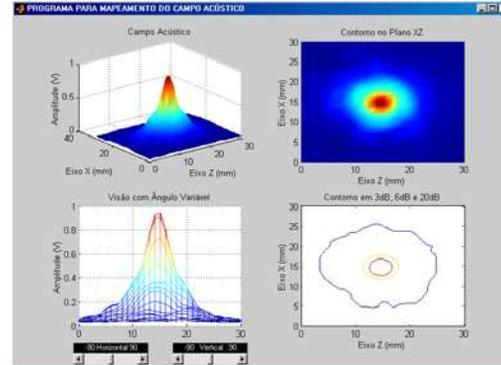
$z_n / 3$



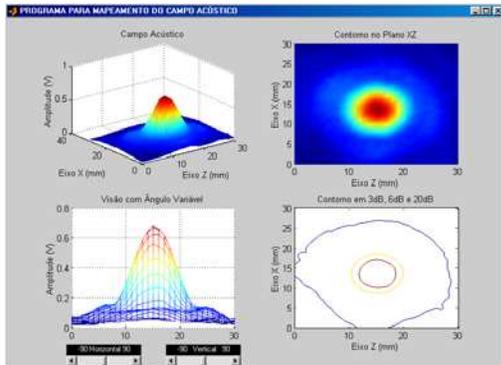
$z_n / 2$



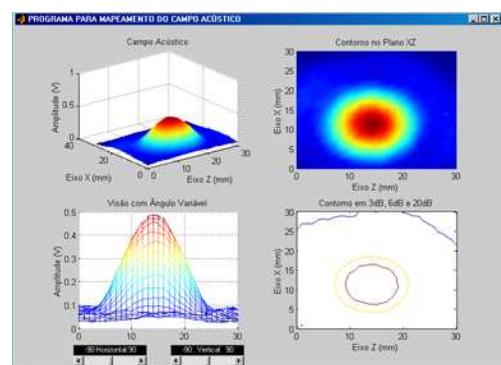
z_n



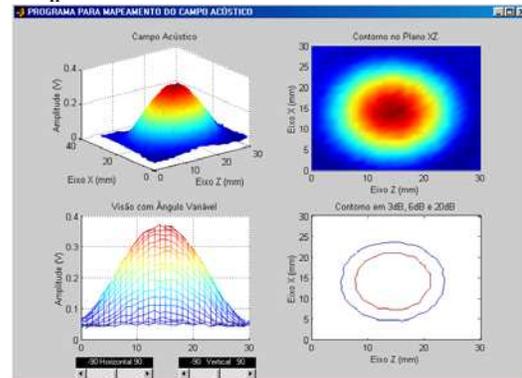
$2 z_n$



$3 z_n$



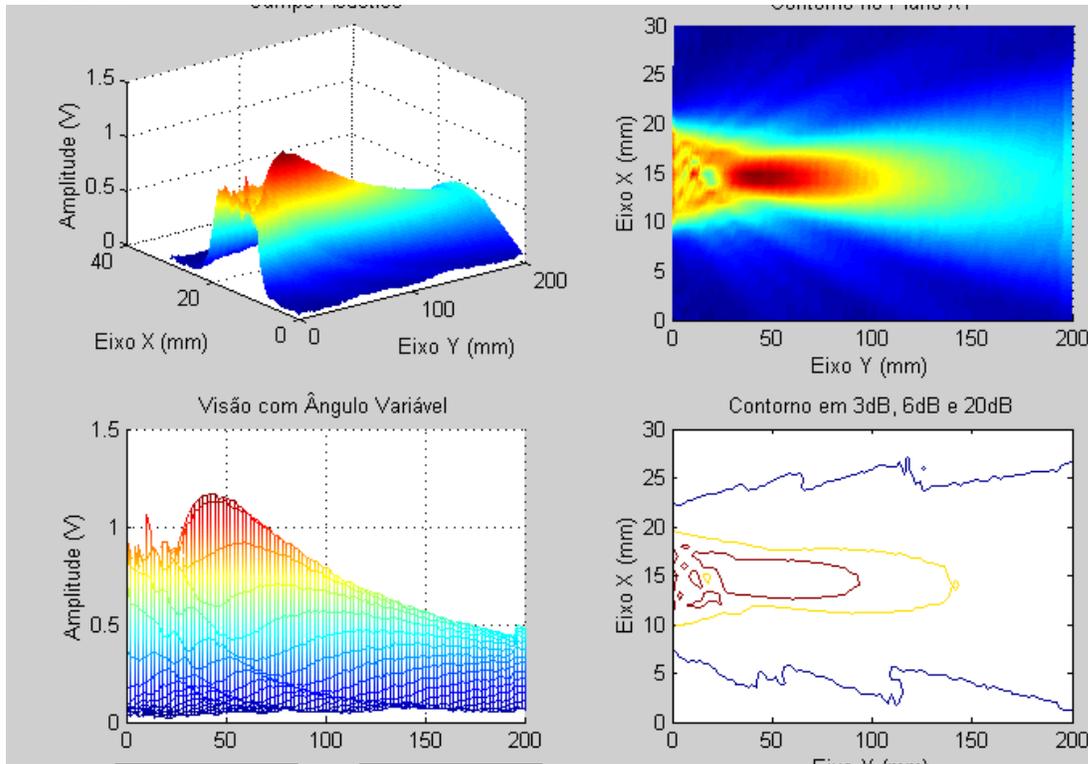
$4 z_n$



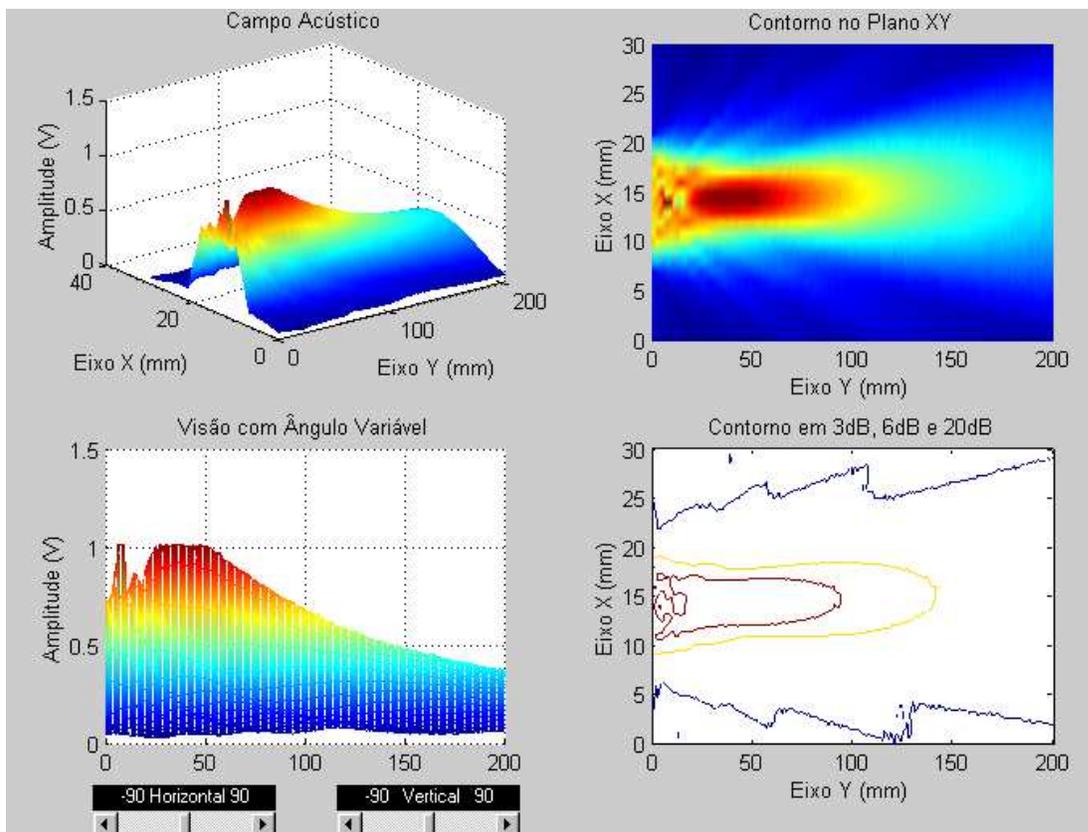
Apêndice D

Mapeamento dos transdutores no plano XY

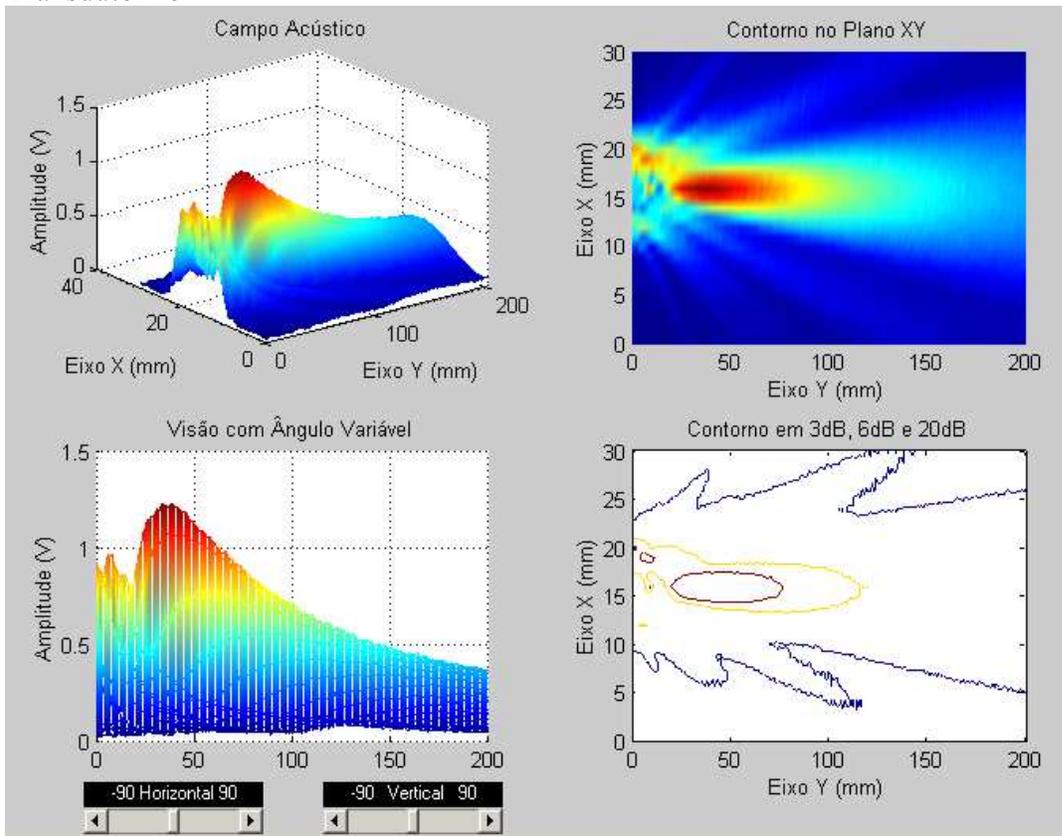
Transdutor #2



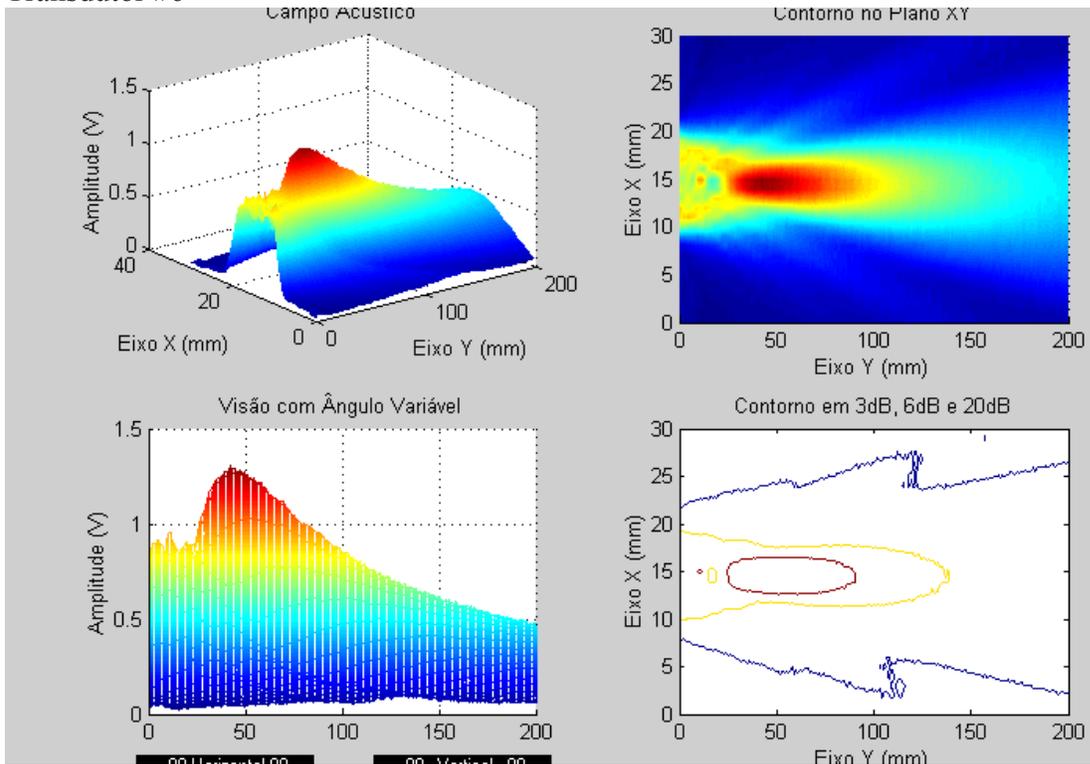
Transdutor #4



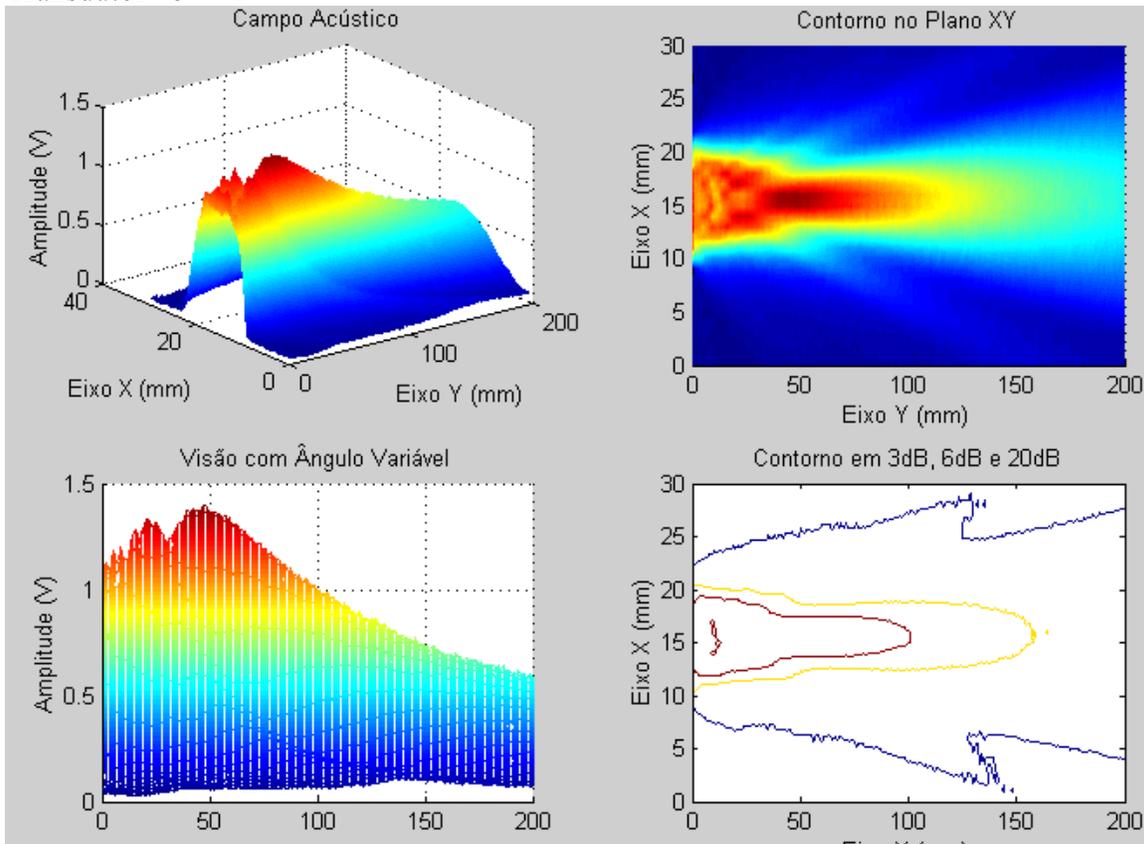
Transdutor #5



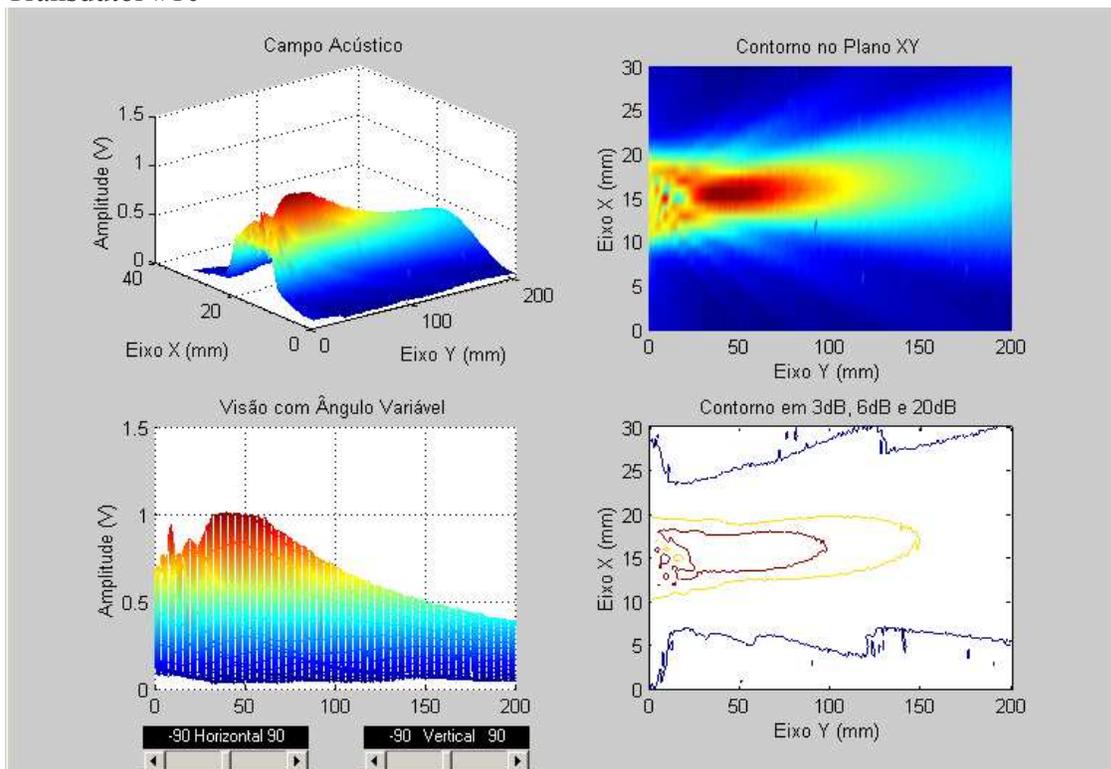
Transdutor #6



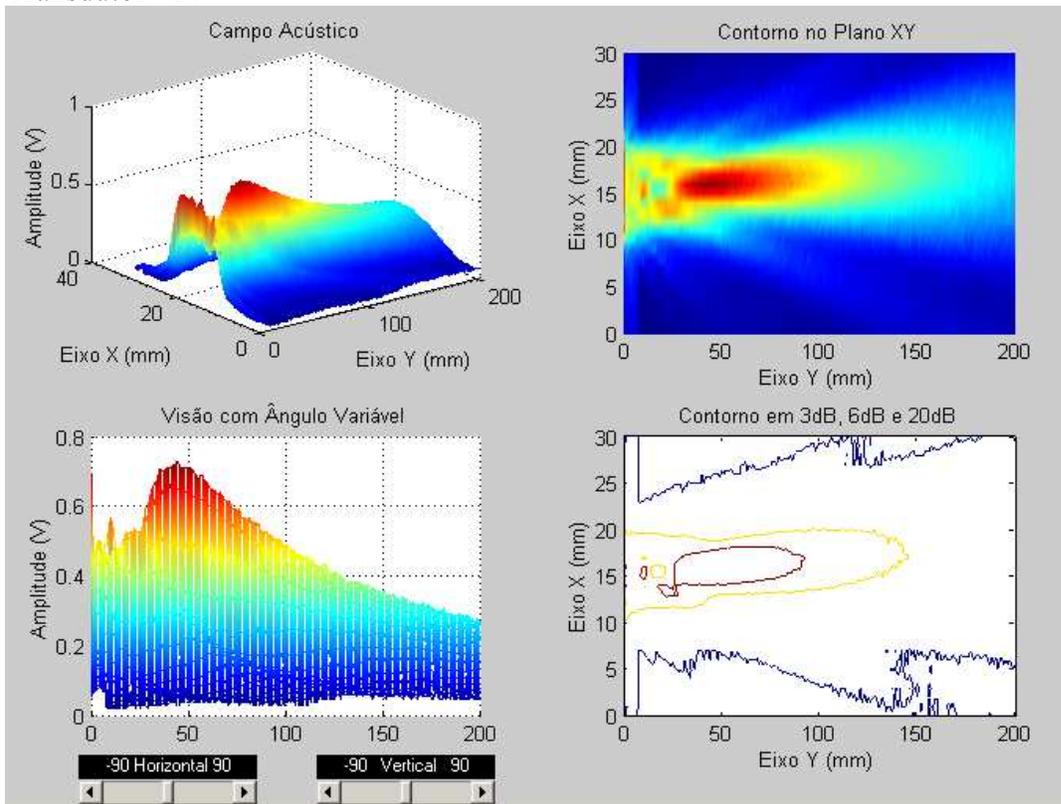
Transdutor #8



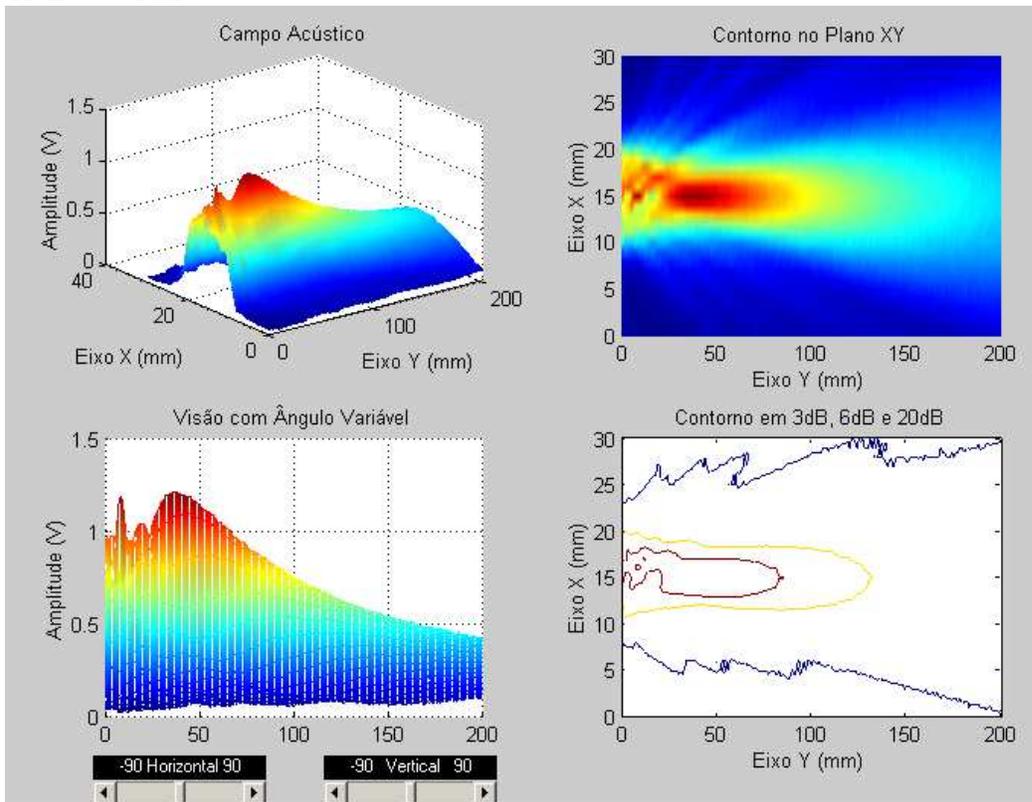
Transdutor #10



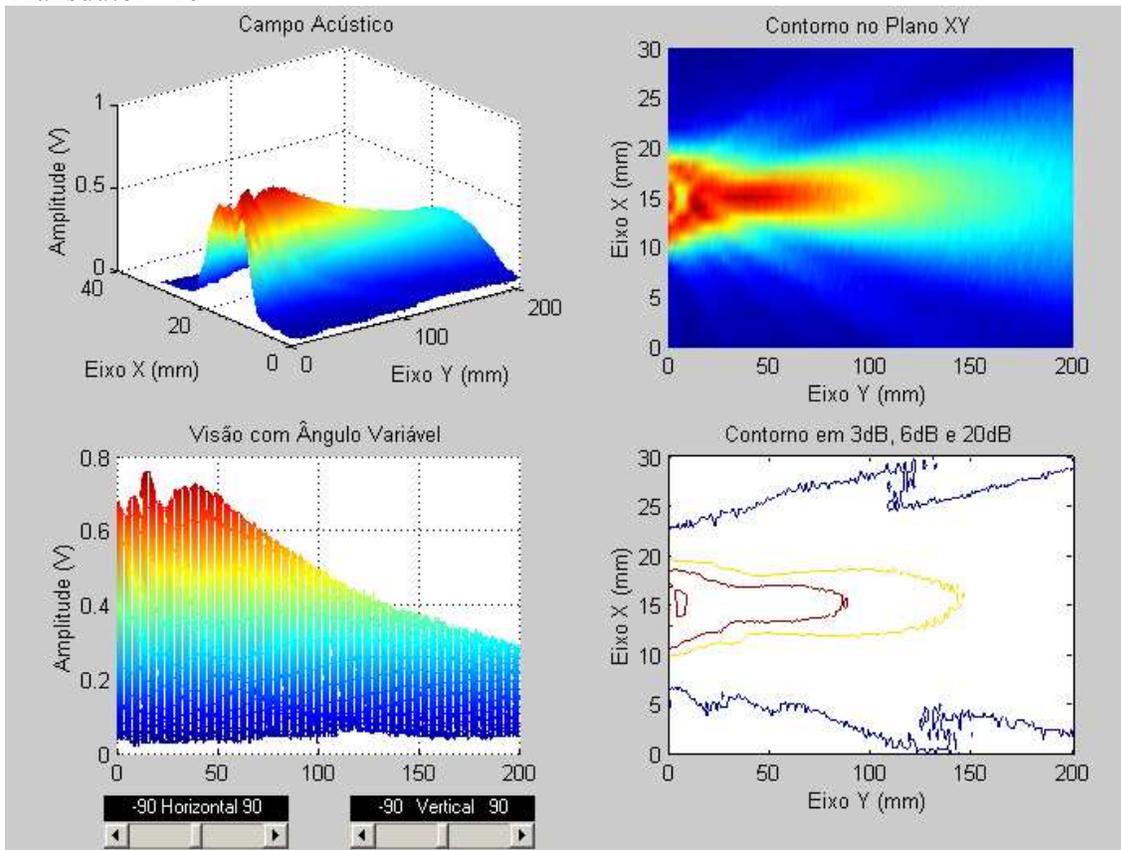
Transdutor #14



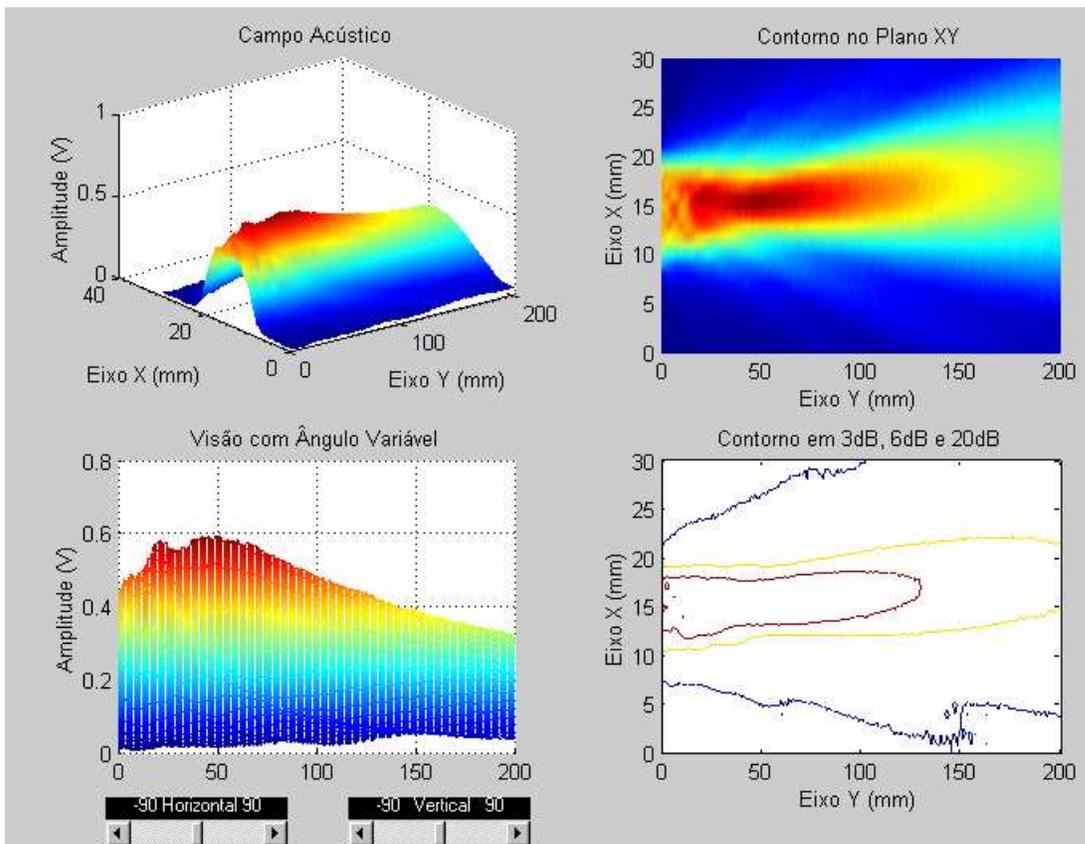
Transdutor #15



Transdutor #16



Transdutor #18



Transdutor #19

