



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

**Dissertação de Mestrado**

**Estudo da Apodização de Cerâmicas  
Piezoelétricas**

**Autor: Mauricio Gomes Duarte**

**Orientadora: Vera Lúcia da Silveira Nantes Button**

Campinas - SP  
Fevereiro – 2003



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

## **Estudo da Apodização de Cerâmicas Piezoelétricas**

Autor: Mauricio Gomes Duarte

Orientadora: Vera Lúcia da Silveira Nantes Button

Banca Examinadora: Prof. Dra. Vera Lúcia da Silveira Nantes Button  
DEB/FEEC/UNICAMP  
Eduardo Tavares Costa  
DEB/FEEC/UNICAMP  
Joaquim Miguel Maia  
CEFET - PR  
Francisco José Arnold  
CESET/UNICAMP

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

Campinas - SP  
Fevereiro – 2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D85e Duarte, Mauricio Gomes  
Estudo da apodização de cerâmicas piezoelétricas /  
Mauricio Gomes Duarte. --Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Vera Lúcia da Silveira Nantes Button  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação.

1. Transdutores ultra-sonicos. 2. Transdutores  
piezoelétricos. 3. Polarização (Eletricidade). I. Button, Vera  
Lúcia da Silveira Nantes. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação. III. Título.

Titulo em Inglês: Study of the apodization of piezoelectric ceramics

Palavras-chave em Inglês: Ultrasonic transducers, Piezoelectric transducers, Polarization  
(Electricity)

Área de concentração: Médica e Biológica

Titulação: Mestrado

Banca examinadora: Eduardo Tavares Costa, Joaquim Miguel Maia e Francisco José  
Arnold

Data da defesa: 6/2/2003

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus. Agradeço a meus pais, Itamar Dias Duarte e Rosa Maria Gomes Duarte pelo apoio. Agradeço a oportunidade e a orientação da Prof<sup>a</sup> Dra. Vera Lúcia da S. Nantes Button. Agradeço a minhas irmãs Mônica e Mayra e a Adriana Gutterres. Aos amigos de Cuiabá e aos amigos com quem morei: José Carlos, Marcos Henrique, Fabiano, Rivaél, Zelman, Helmann, Moisés, Edson Donizete, Edilson, Iguatemi, Roberto e Edvaldo. Aos amigos do departamento: Joaquim, Eduardo Jorge, Valéria, Gláucia, Cláudia, Hayram, Ricardo, Fortal, Lúcio, Daniela, Sandro, Gentil, Gerson, Beatriz, Suzy, Gustavo, Diego, Munir, Nivaldo, José Paulo, Marlene, Sérgio Moura, Nirlei, Val, Miriam, Aldo, Ryan e demais amigos do DEB, DT, DCA, DENNIS, DMO, DEMIC, DECOM e FEM (Claudenete).

Agradeço ao CNPq, à Fapesp e à FINEP/Recope pelo apoio financeiro. Agradeço à CooperPower pelo fornecimento do óleo mineral R-Temp para temperaturas elevadas. Agradeço ao Laboratório de Metalografia do Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP (Rita Buzzo Jacon e Claudenete Vieira Leal) e ao Laboratório de Sensores e Atuadores (Prof. Dr. Júlio César Adamowski e Gilder Nader) do Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi aprimorar o processo de apodização de discos de cerâmica piezoelétrica utilizado no LUS (Laboratório de Ultra-Som, DEB/FEEC e CEB, UNICAMP), buscando estabelecer uma melhor relação entre tempo de aplicação do campo elétrico e a temperatura do banho de óleo isolante usado no processo. A apodização das cerâmicas piezoelétricas é utilizada para reduzir a difração no campo acústico gerado por transdutores de ultra-som, como já foi comprovado no LUS em trabalhos anteriores. Buscou-se reduzir o tempo de aplicação do campo elétrico através do ensaio de temperaturas diferentes do óleo mineral que banha o disco cerâmico e verificando em quais ensaios foi obtida uma boa apodização. Foram utilizadas cerâmicas piezoelétricas PZT-5A de 12,7mm de diâmetro, com 0,885mm (EDO Acoustics) e 1mm (APCI) de espessura. O campo elétrico aplicado foi de 2kV/mm de espessura de cerâmica, e um eletrodo esférico de 5mm de raio foi usado para formatar o campo elétrico de apodização. Foram utilizados dois tipos de óleo mineral: o Nujol, que acima de 160°C evapora rapidamente e o óleo da CooperPower, que permitiu utilizar temperaturas até 250°C, com pouca evaporação. Os discos cerâmicos apodizados para os quais o coeficiente eletromecânico do modo espessura,  $k_t$ , resultou em valores acima de 0,37, foram considerados bem apodizados. O óleo isolante foi aquecido a temperaturas diferentes entre 120°C e 250°C e o campo elétrico foi aplicado por períodos de 2 minutos até 4 horas e 30 minutos (tempo necessário para a temperatura do óleo resfriar até 25°C). Este estudo também incluiu a avaliação do efeito de sucessivas despolarizações e repolarizações nos modos de vibração da cerâmica piezoelétrica. Os resultados confirmaram que, usando temperaturas mais altas (acima de 200°C), o campo elétrico precisa ser aplicado durante um período menor. Apodizações que utilizaram temperatura igual a 160°C, só mostraram acoplamentos bons quando o campo permaneceu aplicado enquanto o óleo resfriava até 25°C. Apodizações em que o óleo foi aquecido a temperaturas inferiores a 160°C não apresentaram bons resultados, independentemente do tempo de aplicação do campo elétrico. Os resultados também mostraram que o efeito de aplicar o campo elétrico ainda antes do óleo ser aquecido foi um aumento do acoplamento eletromecânico obtido, comparando com o resultado de um processo de apodização semelhante, mas em que o campo elétrico só foi aplicado depois do aquecimento do óleo. O mesmo efeito não foi observado com as apodizações em que utilizou-se a temperatura mais alta possível, 250°C, usando o óleo mineral da Copper Power. Concluiu-se

que, usando a temperatura igual a 250°C, foi possível reduzir o tempo de aplicação do campo elétrico de apodização, com resultados satisfatórios, de mais de 4 horas para apenas 2 minutos. No entanto, o processo que utiliza uma dada relação tempo de aplicação do campo/temperatura do óleo, e que apodiza satisfatoriamente uma cerâmica com 1mm de espessura, pode resultar na polarização convencional (linear) de uma cerâmica mais fina, como a cerâmica com espessura igual a 0,885mm. Algumas das cerâmicas apodizadas foram usadas para construir transdutores de ultra-som. Os campos acústicos gerados pelos transdutores construídos foram mapeados, confirmando o aumento da profundidade do campo acústico, como consequência da redução da difração acústica, obtida a partir da apodização da polarização das cerâmicas piezoelétricas.

## ABSTRACT

The objective of this work was to optimize the process of apodization of piezoelectric ceramics disks, looking for the better relation between the insulating oil bath temperature and the smallest period of time through which the poling field must be applied. The apodization of the piezoelectric ceramic is performed to reduce the diffraction in the acoustic field generated by ultrasonic transducers. We looked for the best initial temperature of the insulating mineral oil that surrounds the piezoelectric ceramic, and how long the poling electric field must be applied to the ceramic to achieve a good apodization. We used 12.7mm diameter, 0.885mm and 1mm thickness PZT-5A ceramic disks. The non-uniform poling electric field (2kV/mm) has been shaped by a 5mm radius spherical electrode. The apodized ceramic disks which showed piezoelectric coupling coefficient values larger than 0.37, were considered well apodized. We used oil temperatures from 120°C to above 200°C and the electric field was applied for periods of at least 2 minutes to up to 4 hours and third minutes (until the oil temperature cooled down to 25°C). This study also included the ceramic disk evaluation after successive depolarizations and repolarizations. The results showed that using higher temperatures (above 200°C) we needed to apply the poling field for a shorter time. Temperature equal 160°C was efficient only if the poling field was applied until the oil was cooled down to 25°C (4 hours and thirty minutes). The results also showed that if the poling electric field was applied to the piezoelectric ceramic even before the oil was heated, we obtained larger piezoelectric coupling coefficients, compared to the poling processes where the electric field was applied to the ceramic only after the oil was heated. This was not necessary if we used higher temperatures (250°C). We concluded that using higher temperatures (250°C) it was possible to reduce the apodization process, with good results, from more than 4 hours to only 2 minutes. Ultrasound transducers were built; their acoustic fields were mapped in a water tank, and the results confirmed the increasing of the depth of the acoustic field, as consequence of the acoustic diffraction reduction.

# ÍNDICE

<b>I. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>II. Fundamentos Teóricos .....</b>	<b>7</b>
II. 1- Materiais Cerâmicos .....	7
II. 2- Estruturas Cristalinas .....	7
II. 3- Sistemas Cristalinos .....	8
II. 4- Dipolos .....	11
II. 5- Piezoelectricidade .....	12
II. 5. 1- Domínios .....	14
II. 6- Polarização .....	15
II. 6. 1- Movimentos Atômicos e Vibrações Térmicas .....	21
II. 6. 2- Resistência Física da Cerâmica .....	22
II. 7- Equações da Piezoelectricidade .....	23
II. 7. 1- Parâmetros Piezoelétricos .....	31
II. 8- Modos de Vibração .....	37
II. 8. 1- Ressonância de um Corpo .....	39
II. 8. 2- Frequências de Ressonância e de Anti-Ressonância e Coeficiente de Acoplamento Eletro-Mecânico em um Material Piezoelétrico .....	40
II. 9- Apodização .....	42
<b>III. Materiais e Métodos .....</b>	<b>47</b>
III. 1- Etapas do Processo de Apodização .....	49
III. 1. 1- Documentação da Cerâmica Polarizada de Fábrica .....	49
III. 1. 2- Despolarização da Cerâmica .....	49
III. 1. 3- Retirada do Eletrodo do Lado Positivo da Cerâmica .....	50
III. 1. 4- Apodização .....	50
III. 2- Variações no Processo de Apodização .....	51

III. 2. 1-	Varição de Temperatura do Banho de Óleo Isolante.....	53
III. 2. 2-	Varição de Tempo de Aplicação de Campo Elétrico .....	53
III. 2. 3-	Aplicação do Campo Elétrico DC Desde a Temperatura Ambiente.....	54
III. 2. 4-	Manutenção da Temperatura Constante Durante a Aplicação do Campo Elétrico de Apodização .....	54
III. 2. 5-	Aplicação do Campo Elétrico DC em Altas Temperaturas.....	55
III. 2. 6-	Apodizações utilizando cerâmicas APCI (1mm de espessura) .....	55
III. 3-	Deposição do Eletrodo de Prata ( <i>sputtering</i> ) .....	56
III. 4-	Documentação da Cerâmica Apodizada .....	56
III. 5-	Verificação do Efeito de Polarizações Consecutivas .....	56
III. 6-	Etapas da Montagem dos Transdutores.....	57
III. 6. 1-	Procedimentos para Construção do Transdutor .....	57
III. 7-	Etapas da Caracterização dos Transdutores .....	63
III. 7. 1-	Mapeamento do Campo Acústico no Plano XY .....	67
III. 7. 2-	Pulso-Eco e Largura de Banda .....	69
<b>IV.</b>	<b>Testes e resultados.....</b>	<b>71</b>
IV. 1-	Cerâmicas.....	71
IV. 1. 1-	Cerâmicas Polarizadas .....	71
IV. 1. 2-	Cerâmicas Apodizadas.....	72
IV. 1. 2. 1-	Variações de Temperatura .....	74
IV. 1. 2. 2-	Varição do Tempo de Aplicação do Campo Elétrico de Apodização.....	75
IV. 1. 2. 3-	Variações com Campo Elétrico Aplicado Desde Temperatura Ambiente ..	77
IV. 1. 2. 4-	Variações de Tempo de Aplicação do Campo (1) Mantendo a Temperatura Constante (200°C) Durante a Aplicação do Campo Elétrico e (2) a Temperaturas mais Elevadas (220°C e 250°C), mas não Constantes.....	78
IV. 1. 2. 5-	Apodizações Feitas com as Cerâmicas APCI .....	81
IV. 2-	Transdutores.....	82
IV.2.1-	Transdutores com Cerâmicas EDO e <i>Backing</i> de Tungstênio .....	82
IV. 2. 1. 1-	Mapeamento do Campo Acústico no Plano XY .....	82
IV. 2. 1. 2-	Pulso-Eco .....	84

IV. 2. 2- Transdutores com Cerâmicas EDO e <i>Backing</i> de Alumina .....	87
IV. 2. 2. 1- Compatibilização Elétrica com Utilização de Indutores em Paralelo.....	91
IV. 2. 2. 1. 1- Mapeamento no Plano XY - Comparação Transdutor com e sem Indutor ..	93
IV. 2. 2. 1. 2- Pulso-Eco – Comparação Transdutor com e sem Indutor.....	93
IV. 2. 2. 2- Linha Y e Linhas X.....	95
IV. 2. 2. 3- Pulso-Eco .....	98
IV. 2. 3- Transdutores com Cerâmicas APCI.....	100
IV. 2. 3. 1- Linha Y e Linhas X.....	109
IV. 2. 3. 2- Pulso-Eco .....	113
<b>V. Discussão e Conclusão.....</b>	<b>119</b>
V. 1- Apodização das Cerâmicas da EDO Acoustics.....	119
V. 1. 1- Repolarizações Sucessivas .....	119
V. 1. 2- Repetição do Processo de Apodização que era Usado no LUS .....	121
V. 1. 3- Utilização de Temperaturas abaixo de 160°C na Apodização .....	121
V. 1. 4- Utilização de Temperaturas acima de 160°C na Apodização .....	122
V. 1. 5- Aplicação de Campo Elétrico de Apodização desde o Início do Aquecimento do Óleo .....	122
V. 1. 6- Aplicação de Campo Elétrico Mantendo a Temperatura Constante.....	124
V. 1. 7- Aplicação de Campo Elétrico a Altas Temperaturas (250°C).....	124
V. 2- Transdutores Construídos com Cerâmicas EDO e com Backing de Tungstênio	125
V. 3- Transdutores Construídos com Cerâmicas EDO e com <i>Backing</i> de Alumina ....	126
V. 4- Cerâmicas APCI.....	127
V. 5- Conclusão .....	130
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>133</b>
<b>Apêndices .....</b>	<b>137</b>

# Lista de Figuras

## Capítulo II – Fundamentos Teóricos

Figura II.1 – Estrutura Cristalina do PZT.....	8
Figura II.2 – Estrutura do BaTiO <sub>3</sub> .....	13
Figura II.3 – Orientação dos dipolos na cerâmica ferroelétrica .....	15
Figura II.4 – Curva de histerese.....	17
Figura II.5 – Variação da polarização no PZT-5A em relação à temperatura.....	18
Figura II.6 – Curvas típicas de histerese para o PZT-5A para diferentes temperaturas ..	19
Figura II.7 – Relação entre temperatura e polarização espontânea no BaTiO <sub>3</sub> .....	20
Figura II.8 – Relação da temperatura com a curva de histerese – BaTiO <sub>3</sub> .....	21
Figura II.9 – Notação de eixos para um sólido de cerâmica polarizada .....	23
Figura II.10 – Variação das ctes dielétricas em relação a temperatura PZT-4 e PZT-5A.	33
Figura II.11 – Variação do fator de dissipação. PZT-4 e PZT-5A .....	34
Figura II.12 –12 Modos radial e espessura de vibração de um disco piezoelétrico .....	38
Figura II.13 – Circuito Equivalente de um elemento piezoelétrico na ressonância .....	42
Figura II.14 – Orientação dos dipolos elétricos em um disco piezoelétrico.....	44
Figura II.15 – Propagação de uma frente de onda e a interferência das ondas de borda... 45	

## Capítulo III – Materiais e Métodos

Figura III.1 – Representação esquemática dos dipolos elétricos em uma cerâmica.....	50
Figura III.2 – Orientação dos dipolos elétricos em uma cerâmica apodizada .....	51
Figura III.3 - Diagrama esquemático dos componentes do processo de polarização.....	52
Figura III.4 – Suporte com micrômetro digital para ajustar a distância de $\lambda/4$ .....	59
Figura III.5 – Sistema de vácuo para secar a camada de compatibilização acústica.....	60
Figura III.6 -Etapas da construção de transdutores; soldagem, PVC e mistura de epóxi.	61
Figura III.7 – Etapas da construção; latão, solda e revestimento externo .....	61
Figura III.8 – Etapas da construção; deposição de prata e camada de compatibilização ..	62
Figura III.9 - Etapas da construção; cabo coaxial e epóxi após-vedação final.....	62

Figura III.10 – Etapa final da construção de transdutores, encaixe do pino BNC. ....	62
Figura III.11 – Foto e diagrama esquemático do sistema de mapeamento do LUS .....	65
Figura III.12 - Sistema de coordenadas adotado no tanque de medidas do LUS.....	67
Figura III.13 – Exemplo da representação de campo gerada pelo programa MAPEAM..	67
Figura III.14 – Intensidade de campo ao longo dos eixos X e Y .....	68
Figura III.15 - Sistema de coordenadas adotado no tanque de medidas c/ alvo refletor ...	69
Figura III.16 - Eco gerado por um pulso senoidal de excitação .....	69

#### **Capítulo IV – Testes e resultados**

Figura IV.1 – Curva de Fase da Impedância x Freq. de uma cerâmica polarizada. ....	72
Figura IV.2 – Resultados dos testes de repolarizações.....	73
Figura IV.3 – k nas apodizações c/ variação de temperatura e campo desde TA .....	74
Figura IV.4 – Gráfico de Fase da Impedância x Freq. de uma cerâmica apodizada .....	75
Figura IV.5 – k nas apodizações c/ variação do tempo do campo 160°C e 200°C .....	76
Figura IV.6 –Apodizações c/ campo aplicado ao atingir 160°C e desde TA .....	77
Figura IV.7 – Apodizações c/ campo aplicado ao atingir 200°C e desde TA .....	78
Figura IV.8 – apodizações c/ campo desde TA, a 200°C, c/ campo cte e a 220° C.....	79
Figura IV.9 –k de apodizações c/ temperaturas e métodos diferentes.....	80
Figura IV.10 –k das apodizações e de uma polarização c/ cerâmica APCI .....	81
Figura IV.11 – Mapeamento dos transdutores no eixo XY .....	83
Figura IV.12 – Excitações senoidal e retangular; eco e larguras de banda obtidas.....	85
Figura IV.13 – Excitação senoidal e retangular, larguras de banda e espectro de freq. ....	86
Figura IV.14 – Fase x Freq. após cada etapa de construção do transdutor Mt 38.....	88
Figura IV.15 – Fase x Freq. após cada etapa de construção do transdutor Mt 39.....	89
Figura IV.16 – Fase x Freq. após cada etapa de construção do transdutor Mt 41.....	90
Figura IV.17 – Fase x Freq. após cada etapa de construção do transdutor Mt 42.....	91
Figura IV.18 – Módulo e Fase de Z x Freq. do Mt 39 c/ indutor de 1,8µH e de 2,2µH....	92
Figura IV.19 – Comparação entre mapeamentos p/ o Mt 38 sem indutor e com indutor .	93
Figura IV.20 – Pulsos gerados pelo Mt 38 e Mt 39 sem indutor e com indutor .....	94
Figura IV.21 – Largura de banda do Mt 38 e do Mt 39 sem indutor e com indutor .....	95
Figura IV.22 – Linhas Y, obtidas com Mt 38, Mt 41, Mt 39 e Mt 42.....	96
Figura IV.23 – Linha X obtida com Mt 38 e Mt 39 .....	97

Figura IV.24 – Linha X obtida com Mt 41 e Mt 42 .....	98
Figura IV.25 – Pulso captado no campo distante e largura de banda. Mt 38 e Mt 39 .....	99
Figura IV.26 – Pulso captado no campo distante e largura de banda. Mt 41 e Mt 42.....	100
Figura IV.27 – Módulo e fase de Z x Freq. cer. 56 pol de fábrica e pol. com 1 kV/mm	102
Figura IV.28 – Fase de Z x Freq. após cada etapa de construção do Mt 50_1 .....	104
Figura IV.29 – Fase de Z x Freq. após cada etapa de construção do Mt 51 .....	105
Figura IV.30 – Fase de Z x Freq. após cada etapa de construção do Mt 52_1 .....	106
Figura IV.31 – Fase de Z x Freq. após cada etapa de construção do Mt 53.....	107
Figura IV.32 – Fase de Z x Freq. após cada etapa de construção do Mt 54_1 .....	108
Figura IV.33 – Fase de Z x Freq. após cada etapa de construção do Mt 55_1 .....	109
Figura IV.34 – Linha Y do transdutor Mt 50_1. ....	110
Figura IV.35a – Linha Y do transdutor Mt 51.....	110
Figura IV.35b – Linhas X do transdutor Mt 51 .....	111
Figura IV.36a – Linha Y do transdutor Mt 53.....	111
Figura IV.36b – Linhas X do transdutor Mt 53 .....	112
Figura IV.37a – Linha Y do transdutor Mt 54_1.....	112
Figura IV.37b – Linhas X do transdutor Mt 54_1 .....	113
Figura IV.38 – Pulso senoidal e retangular negativo, e larguras de banda do Mt50_1 ...	114
Figura IV.39 – Pulso senoidal e retangular negativo, e larguras de banda do Mt51 .....	115
Figura IV.40 – Pulso senoidal e retangular negativo, e larguras de banda do Mt53 .....	116
Figura IV.41 – Pulso senoidal e retangular negativo, e larguras de banda do Mt54_1 ...	117
Figura IV.42 – Pulso senoidal e retangular negativo, e largura de banda do Mt55_1 ....	118

## Apêndices

Apêndice.I – Documentação de Cerâmicas Polarizadas .....	133
Apêndice.II – Documentação das Principais Cerâmicas Apodizadas .....	134

# Lista de Tabelas

## Capítulo II – Fundamentos Teóricos

Tabela II.1 – Classes Cristalográficas .....	10
Tabela II.2 – Ctes elásticas, dielétricas e piezoelétricas p/ material piezoelétrico pol.....	29
Tabela II.3 – Propriedades dielétricas, ferroelétricas e piezoelétricas de PZT.....	37

## Capítulo IV – Testes e Resultados

Tabela IV.1 – k e freq. de ressonância e anti-ress. após cada etapa de construção EDO..	87
Tabela IV.2 – Valores de indutância p/ compatibilização elétrica dos transdutores.....	92
Tabela IV.3 – Freq. de ressonância, anti-ress e k das cerâmicas APCI pol. de fábrica...	101
Tabela IV.4 – Freq. de ress, anti-ress e k das APCI apodizadas e da 56 repol. 1kV/mm	101
Tabela IV.5 – Freq. de ress, anti-ress e k das etapas de construção APCI.....	103

## Lista de Símbolos

$\lambda$	Comprimento de onda
$\rho$	Densidade do material em Kg/m <sup>3</sup>
$k$	Coefficiente de acoplamento eletro-mecânico
$k_t$	$k_{33}$ - Coef.de acoplamento eletro-mecânico – modo espessura
$K_{ef}$	Coefficiente de acoplamento efetivo
$K_{31}$	Coefficiente de acoplamento planar
$E_c$	Campo coercitivo
$P$	Polarização
$P_R$	Polarização remanescente
$E$	Campo elétrico
$P_{sat}$	Polarização de saturação
$C$	Capacitância
$A$	Área do eletrodo do capacitor
$\epsilon$	Constante dielétrica ou permissividade elétrica
$\epsilon_r$	K - Constante dielétrica relativa
$\epsilon_0$	Constante dielétrica do ar
$V$	Tensão elétrica
$t$	Espessura do dielétrico
$Q$	Carga elétrica
$D$	Deslocamento elétrico
$T$	Tensão mecânica
$S$	Deformação mecânica
$F$	Força aplicada

$\delta$	Alongamento
L	Comprimento do material
Y	Módulo de elasticidade ou módulo de <i>Young</i>
d	Constante piezoelétrica – coeficiente de carga piezoelétrica
s	Constante elástica ou compliância elástica
g	Coeficiente de tensão elétrica piezoelétrico
$\tan\delta$	Fator de dissipação
fr	Frequência de ressonância
fa	Frequência de anti-ressonância
f	Frequência
Xm	Reatância de massa
m	massa
Xe	Reatância elástica
w	Largura da cerâmica
R	Resistência
Z	Impedância
L <sub>0</sub>	Indutância
C <sub>0</sub>	Capacitância
V <sub>pp</sub>	Tensão elétrica pico a pico
r	Raio

## I. INTRODUÇÃO

Após o descobrimento do efeito piezoelétrico, foi criada uma linha de desenvolvimento tecnológico totalmente diferenciada do que já se tinha visto, incorporando a aplicação da piezoeletricidade nos mais diversos dispositivos, desde sensores de fluxo e de pressão, com aplicações industriais e médicas, até transdutores multi-elementos complexos, capazes de reproduzir em imagens 3D órgãos internos do corpo humano.

A piezoeletricidade é uma propriedade existente em certos materiais capazes de desenvolverem uma diferença de potencial quando submetidos à deformação mecânica e vice-versa. A origem microscópica do efeito piezoelétrico é o deslocamento das cargas iônicas dentro do cristal. Na ausência de uma tensão mecânica externa, a distribuição de cargas dentro do cristal é simétrica e o momento de dipolo elétrico é nulo. Porém, quando uma tensão mecânica externa é aplicada, as cargas são deslocadas e a distribuição das mesmas passa a ser assimétrica. Para um material apresentar piezoeletricidade, sua estrutura cristalina não pode possuir centro de simetria.

O efeito piezoelétrico foi descoberto pelos irmãos Curie (1880) quando estudavam os efeitos da pressão na geração de cargas elétricas em cristais como quartzo, turmalina e sal de Rochelle. O termo piezoeletricidade (piezo = pressão, em grego) foi primeiramente sugerido por Hankel. O efeito reverso da piezoeletricidade foi deduzido por Lipmann a partir dos princípios da termodinâmica. A partir daí, devido à colaboração da comunidade científica européia, o campo da piezoeletricidade se estabeleceu. Langevin et al, citado por JORDAN (2001), desenvolveram um transdutor ultra-sônico durante a I Guerra Mundial. O sucesso obtido abriu as portas para a aplicação de materiais piezoelétricos, principalmente associada ao ultra-som, que com sua eficiência e versatilidade foi de suma importância para o reconhecimento deste tipo de tecnologia.

A evolução da ciência e da tecnologia oferece a cada dia, condições mais favoráveis de trabalho para médicos e cientistas, em se tratando de formas e métodos mais práticos e

eficientes de diagnóstico e terapia de doenças, em seus estágios iniciais, e de ensaios não-destrutivos de materiais. Os equipamentos de ultra-som para diagnóstico não utilizam radiação ionizante, e são capazes de fornecer dados e obter imagens com um padrão de qualidade extremamente elevado, em relação às primeiras versões.

O equipamento de ultra-som tem como princípio a propagação de ondas mecânicas através do meio que se quer estudar e, através da captação das ondas mecânicas refletidas pelo meio, obtém-se informações sobre os tipos e as localizações de estruturas do meio.

Muitas das pesquisas atuais em ultra-som estão voltadas para a qualidade da imagem obtida pela captação das ondas mecânicas refletidas, buscando uma melhor resolução da imagem final, seja pelo aprimoramento dos programas de processamento, pelo desenvolvimento do *hardware*, como aprimorando também a utilização dos princípios físicos do ultra-som. No LUS, Laboratório de Ultra-Som do Departamento de Engenharia Biomédica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação e do Centro de Engenharia Biomédica da UNICAMP, são realizadas pesquisas principalmente nas linhas de aprimoramento da utilização dos princípios físicos do ultra-som, sejam na simulação do campo acústico transmitido em meios com contraste, seja na construção de transdutores com cerâmicas piezoelétricas apodizadas para gerar campo acústico menos difrativo. O trabalho apresentado nesta dissertação diz respeito ao estudo da apodização da polarização de cerâmicas piezoelétricas.

O transdutor de ultra-som é o componente responsável pela transformação da energia elétrica em energia acústica, que é transmitida para um meio geralmente considerado elástico, e de forma inversa, pela transformação da energia mecânica, gerada pela vibração mecânica refletida no meio, em energia elétrica. Num equipamento de imagem por ultra-som, quanto mais eficiente for a emissão e a recepção destas ondas mecânicas, e a transformação da energia elétrica em energia mecânica e vice-versa, melhor será a imagem obtida e conseqüentemente, se poderá obter um diagnóstico mais eficiente. O transdutor de ultra-som possui como elemento ativo (único ou múltiplos) cerâmicas piezoelétricas que são usadas geralmente nos formatos circulares, em forma de discos ou anéis, e retangulares.

Para a realização deste trabalho foi necessário estudar a cristalografia destas cerâmicas, como também o processo para polarização das mesmas, as equações da piezoeletricidade e suas constantes e os modos de vibração das cerâmicas polarizadas.

Materiais piezoelétricos são materiais que possuem momento de dipolo elétrico. Esta piezoeletricidade muitas vezes não é percebida, pois os momentos de dipolo elétrico do material se anulam por estarem desalinhados e, só é percebida quando os dipolos elétricos do material são rearranjados em uma mesma direção, de modo que se somem de forma construtiva, formando domínios. O processo pelo qual obtemos o alinhamento destes dipolos é denominado polarização elétrica, BUTTON (1998).

A polarização elétrica consiste na aplicação de um campo elétrico DC na cerâmica, de valor superior ao campo coercitivo, para que ocorra um realinhamento na estrutura atômica da mesma. A polarização é realizada enquanto a cerâmica está imersa em óleo isolante aquecido até a temperatura de Curie, que é a temperatura na qual o cristal perde totalmente suas orientações cristalográficas, que são facilmente redirecionadas sob a influência de um campo elétrico externo. Na prática, utilizam-se temperaturas abaixo do ponto de Curie, pois mesmo antes de perderem totalmente suas orientações cristalográficas, os dipolos dos materiais piezoelétricos já são capazes de se realinhar com a direção do campo elétrico externo aplicado, VAN VLACK (1964), IBRAHIM (1991).

Quando um disco de cerâmica, polarizado com o campo elétrico aplicado entre suas faces, for excitado com tensão elétrica, o disco poderá vibrar com maior intensidade na direção axial da cerâmica, dependendo da espessura do disco e da frequência aplicada, ou seja, no modo espessura, fazendo com que a propagação da onda mecânica gerada se intensifique nesta direção.

As características do campo acústico gerado por um transdutor são importantes para as aplicações do sinal obtido. Este sinal acústico é dependente também da forma como o transdutor de ultra-som é construído: um elemento ativo ou múltiplos elementos; a camada

de anteparo do transdutor deve ser eficiente para amortecer a vibração mecânica no sentido contrário de propagação e evitar reverberação no interior do elemento ativo, e com isso, emitir um pulso mais curto, de banda larga; da impedância acústica da camada de compatibilização, que deve ter um valor intermediário entre o material piezoelétrico utilizado e o meio de propagação, para diminuir as perdas que seriam ocasionadas por reflexão das ondas mecânicas entre estes dois meios; da compatibilização elétrica do transdutor com o equipamento que gera os pulsos de excitação elétrica; e do revestimento do transdutor, que deve ser eletricamente isolado e piezoeletricamente inerte.

O campo acústico gerado por um transdutor tem duas regiões bem definidas, que são o campo próximo (zona de Fresnel) e o campo distante (zona de Fraunhöffer). O campo próximo é caracterizado pelo padrão de interferência construtiva ou destrutiva causado pela difração acústica, resultante da propagação de ondas planas, geradas no centro da face do disco, e das ondas geradas na região de borda da cerâmica, que se propagam com atraso espacial, pelo fato das bordas da cerâmica estarem presas. No campo distante também ocorre difração acústica, mas o atraso entre ondas de borda e planas é menos preponderante, ocorre interferência total, e o padrão do campo é de intensidade decrescente com a distância da face do transdutor, STEPANISHEN (1971), WEIGHT e HAYMAN (1978), WEIGTH e RESTORI (1986).

O objetivo da apodização de cerâmicas piezoelétricas é reduzir a difração acústica no campo gerado pelos transdutores de ultra-som, aumentando com isto a profundidade de alcance do campo acústico e reduzindo a presença de lobos laterais no campo, BUTTON, COSTA e MAIA (2000).

A apodização de cerâmicas piezoelétricas (polarização não uniforme) é realizada no LUS já há alguns anos, utilizando um eletrodo esférico de diâmetro menor que o diâmetro da cerâmica para formatar o campo elétrico de polarização desta cerâmica. O formato do campo elétrico resultante permite que ocorra um alinhamento mais intenso dos dipolos elétricos na região central da cerâmica e uma menor influência do campo elétrico na região de borda desta cerâmica. Isto reduz o alinhamento dos dipolos da região da borda do disco

cerâmico; a borda da cerâmica irá vibrar menos intensamente, reduzindo assim, a difração do campo acústico gerado pelo transdutor construído com a cerâmica apodizada.

Resultados obtidos por BUTTON (1998) comprovaram a eficiência da apodização na redução da difração acústica. No processo de apodização utilizado a cerâmica despolarizada foi aquecida até 160°C num banho de óleo isolante; atingida esta temperatura, o campo elétrico de apodização era aplicado enquanto a cerâmica resfriava novamente até a temperatura ambiente. O processo demorava em média 4 horas e 30 minutos para se completar.

## **Objetivos**

Neste trabalho buscou-se definir o melhor método para apodizar cerâmicas piezoelétricas. Foram utilizados discos de cerâmica piezoelétrica PZT-5A (titanato zirconato de chumbo) de 12,7mm de diâmetro com 0,885mm de espessura, da EDO Acoustics, e com 1mm de espessura, da APCI (American Piezoelectric Ceramic Incorporation). O principal objetivo foi obter a melhor relação entre a duração de aplicação do campo elétrico e a temperatura de aquecimento do óleo isolante. Investigou-se também o melhor momento durante o processo para aplicação do campo elétrico. O estudo inclui testes para verificar se o fator de acoplamento piezoelétrico era alterado quando uma mesma cerâmica era submetida a despolarizações e polarizações repetidas. O campo elétrico utilizado foi de 2kV/mm de espessura e foi aplicado com um eletrodo de raio 5mm. Com alguns dos discos cerâmicos apodizados que apresentaram coeficiente de acoplamento eletromecânico satisfatório, foram construídos transdutores de ultra-som. Através da comparação das curvas de módulo e fase da impedância dos transdutores em função da frequência e dos campos acústicos gerados pelos transdutores, mapeados no Sistema de Mapeamento Acústico do LUS, buscou-se determinar qual foi o melhor processo de apodização.

## **II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **II. 1 MATERIAIS CERÂMICOS**

São compostos de elementos metálicos e não-metálicos que apresentam tanto ligações iônicas como covalentes. As ligações iônicas conferem aos materiais cerâmicos uma estabilidade relativamente alta.

Os materiais cerâmicos possuem estruturas cristalinas que, comparadas com as dos metais, são relativamente complexas. Esta complexidade e a maior resistência das ligações que mantém os átomos unidos, tornam as reações a altas temperaturas na estrutura cerâmica, mais lentas, VAN VLACK (1964, 1973).

### **II. 2 ESTRUTURAS CRISTALINAS**

Uma estrutura é considerada cristalina quando a molécula tem uma regularidade estrutural, porque as ligações covalentes determinam um número específico de vizinhos para cada átomo e a orientação no espaço dos mesmos.

O sólido perfeito pode ser visualizado como um conjunto de blocos idênticos de átomos justapostos. Ao espaço definido pelo grupo mínimo de átomos, que permite a reprodução do sólido, chamamos de célula primitiva. Algumas vezes é preferível a utilização de um grupo de átomos maior que aquele correspondente à célula primitiva, como por exemplo, quando dois ou mais grupos mínimos de átomos idênticos representam com mais clareza o sólido em questão. A todo grupo de átomos que por reprodução repetitiva, permita a geração do sólido, corresponde um espaço físico que chamamos de célula unitária. A célula primitiva é, assim, a menor célula unitária para um dado sólido, LEITE e CASTRO (1978).

## II. 3 SISTEMAS CRISTALINOS

A simetria de um cristal é a propriedade da estrutura coincidir consigo mesma mediante certas transformações, chamadas operações de simetria. As possíveis combinações das operações de simetria de poliedros cristalinos que formam os 32 grupos pontuais (coleção de operações de simetria aplicadas a um ponto da rede) ou 32 classes de simetria (cada classe é constituída por todos os cristais com mesma simetria de grupo pontual) são agrupadas em sete sistemas cristalinos: triclínico, monoclínico, ortorrômbico, tetragonal, cúbico, romboédrico ou trigonal, e hexagonal, IEEE STANDARD ON PIEZOELECTRICITY (1978).

Os sistemas cristalinos estão intimamente relacionados com o modo pelo qual o espaço pode ser dividido em volumes iguais, pela intersecção das superfícies planas. Qualquer célula unitária deverá se encaixar em um dos sete tipos de sistemas cristalinos, VAN VLACK (1964). A Figura II.1 ilustra a estrutura cristalina do PZT.

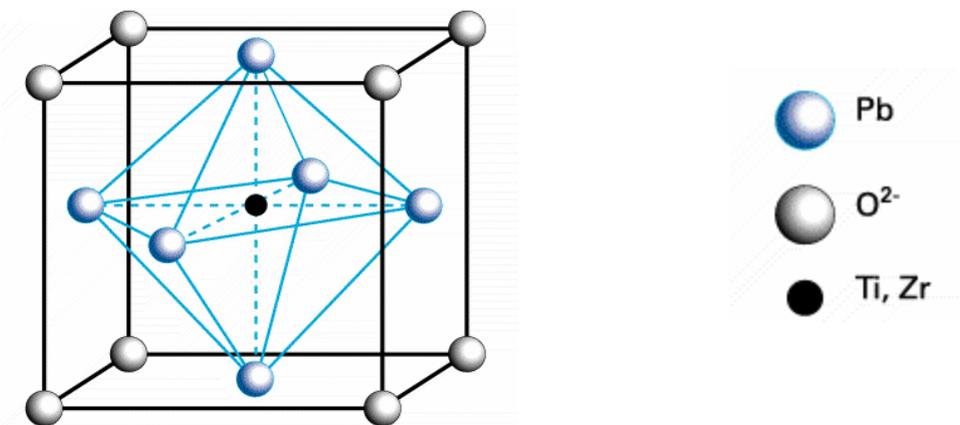


Figura II.1 Estrutura cristalina do PZT (modificado de PI, 2003)

A célula unitária é o menor grupo de átomos dentro do cristal cuja repetição no espaço gera todo o cristal e sua simetria é que determina se é possível ou não ocorrer piezoeletricidade, sendo necessário para ocorrer a piezoeletricidade a ausência de um centro de simetria nesta célula unitária.

Das 32 classes cristalográficas em que todos os materiais cristalinos podem ser divididos, 21 classes são de cristais que não apresentam centro de simetria. Destas, 20 classes apresentam piezoelectricidade. Dentre estas 20 classes, 10 são de cristais que no estado não deformado possuem um eixo polar (um momento de dipolo elétrico). Nestes cristais que possuem um único eixo polar, quando aquecidos uniformemente (ou não) ocorre variação na intensidade de dipolo com a temperatura, sendo denominados piroelétricos. Frequentemente esta polarização espontânea não pode ser detectada pelas cargas na superfície do cristal porque a distribuição de cargas no interior do cristal é aleatória e estas cargas acabam se anulando. No entanto, a polarização espontânea é em geral dependente da temperatura e a existência desta pode ser detectada observando o fluxo de cargas de elétrons, de e para a superfície do cristal, como resultado da mudança de temperatura, que é chamada piezoelectricidade, LINES e GLASS (1977). Nas outras 10 classes de cristais piezoeletricos restantes o momento de dipolo resultante do cristal não deformado é nulo, e o dipolo só deixará de ser nulo se o cristal for deformado não isostaticamente ou se for aquecido não uniformemente, IBRAHIM (1991).

A classe de cristais que não apresenta piezoelectricidade e centro de simetria é a 432, pertencente ao sistema cúbico e, as 10 classes de cristais polares são: 1, 2, m, 2mm, 4, 4mm, 3, 3m, 6, 6mm. A Tabela II.1 apresenta as classes cristalográficas e suas características. Nota-se que as classes cristalográficas que apresentam centro de simetria não apresentam piezoelectricidade e piezoelectricidade.

Tabela II.1 Classes cristalográficas (Modificado de Lines e Glass, 1977)

Sistemas Cristalinos	Classes Cristalinas	Piro - eletricidade	Piezo - eletricidade	Centro de Simetria
Triclínico	1	√	√	
	$\bar{1}$			√
Tetragonal	4	√	√	
	$\bar{4}$		√	
	4/m			√
	422		√	
	4mm	√	√	
	$\bar{4}2m$		√	
	4/mmm			√
Hexagonal	6	√	√	
	$\bar{6}$		√	
	6/m			√
Hexagonal	622		√	
	6mm	√	√	
	$\bar{6}m2$		√	
	6/mmm			√
Monoclínico	2	√	√	
	m	√	√	
	2/m			√
Ortorrômbico	222		√	
	mm2	√	√	
	mmm			√
Trigonal	3	√	√	
	$\bar{3}$			√
	32		√	
	3m	√	√	
	$\bar{3}m$			√
Cúbico	23		√	
	m3			√
	$\bar{4}32$			
	43m		√	
	m3m			√

## II. 4 DIPOLOS

Os dipolos e o momento de dipolo elétrico são enfatizados, pois a existência de um momento de dipolo elétrico resultante não nulo é determinante para o comportamento do material cerâmico aplicado no nosso estudo.

Quando dois átomos idênticos se combinam, como, por exemplo, no  $H_2$ , ambos os átomos têm a mesma eletronegatividade. Uma vez que cada átomo é igualmente capaz de atrair o par de elétrons da ligação, este será compartilhado igualmente e gastará, em média, 50% do tempo nas vizinhanças de cada núcleo. Então, cada átomo de H tem, em torno de si, dois elétrons durante 50% do tempo, o que é o mesmo que ter, em média, um elétron o tempo todo. Este elétron, em média, neutraliza completamente a carga positiva em cada núcleo, e cada átomo no  $H_2$  possui uma carga líquida nula.

Se as eletronegatividades dos dois átomos em uma ligação são diferentes, o par de elétrons ficará a maior parte do seu tempo em torno do elemento mais eletronegativo. Considere, por exemplo, a molécula de HCl. O cloro é mais eletronegativo do que o hidrogênio, uma vez que o par de elétrons na ligação H-Cl gasta mais tempo em torno do cloro do que em torno do hidrogênio. Isso significa que o átomo de Cl adquire uma pequena carga negativa, e o átomo de H, uma pequena carga positiva.

Cargas iguais, positiva e negativa, separadas por uma distância constituem um dipolo. A molécula de HCl, com seus centros de carga positiva e negativa é, portanto, um dipolo e é dita polar. Daí, qualquer molécula diatômica (uma molécula formada por dois átomos) formada a partir de dois elementos de eletronegatividades diferentes será polar, BRADY e HUMISTON (1982).

Um dipolo é definido, quantitativamente, por seu momento de dipolo, ou seja, o produto da carga comum a ambas as extremidades do dipolo pela distância entre as cargas. Uma molécula muito polar é aquela que tem um grande momento de dipolo, enquanto que uma molécula apolar não tem momento de dipolo. Quando três ou mais átomos estão ligados entre si, é possível ter-se uma molécula apolar, ainda que existam ligações polares.

O momento de dipolo total de uma molécula resulta da soma dos dipolos individuais das ligações dentro da molécula, que são somados como vetores. No CO<sub>2</sub>, estes dipolos das ligações estão orientados em direções opostas e se cancelam.

Em geral, uma molécula poliatômica será apolar somente se suas ligações forem apolares ou se suas estruturas tiverem os efeitos dos dipolos das ligações cancelados.

Um elemento muito eletronegativo tem um potencial de ionização muito alto, sendo difícil remover seus elétrons, e uma afinidade ao elétron muito elevada, resulta em espécies muito estáveis quando elétrons são adicionados BRADY e HUMISTON (1982).

## **II. 5 PIEZOELETRICIDADE**

É a propriedade que alguns materiais possuem de adquirir polarização elétrica quando submetidos a tensões ou trações mecânicas externas ou, de sofrerem deformação mecânica quando submetidos a um campo elétrico. O termo piezoelectricidade originou-se do grego, onde piezo significa pressão, HOLLAND, RICHARD e EERNISSE (1969), JAFFE, COOK Jr e JAFFE (1971), ICHINOSE (1983).

A piezoelectricidade é uma propriedade inerente a certos materiais, sendo que sua existência ou não em um material depende da simetria da estrutura deste material, exigindo a ausência de um centro de simetria no cristal. Só neste caso, haverá um deslocamento do centro elétrico de carga quando o cristal for submetido a um esforço, e uma resultante geração de carga sobre as faces do cristal, MERZ e FATUZZO (1967), ANGELOTTI (1982), IEEE STANDARD ON PIEZOELECTRICITY (1987), SILVA (1993).

A origem microscópica do efeito piezoelétrico é decorrente do deslocamento de cargas iônicas dentro da estrutura cristalina. Na ausência de uma tensão mecânica externa, a distribuição de cargas dentro do cristal é simétrica e o momento de dipolo resultante é nulo. Ao aplicarmos uma tensão externa, as cargas serão deslocadas e sua distribuição no interior do cristal não será simétrica, JORDAN (2001).

**Materiais cerâmicos ferroelétricos** – Apresentam polarização elétrica espontânea que pode ser revertida pela aplicação de um campo elétrico adequado. Este processo é conhecido como chaveamento e é acompanhado de histerese, LINES e GLASS (1977), IEEE STANDARD (1985), ARNOLD (1995). Após a retirada do campo elétrico, os íons voltam a vibrar em torno de suas posições originais, mas devido à histerese, nem todos os deslocamentos iônicos são reversíveis.

Considerando por exemplo, o BaTiO<sub>3</sub> (Titanato de Bário): abaixo de 120°C, quando as vibrações térmicas são menos vigorosas, o íon Ti<sup>4+</sup> permanece em uma das duas posições de baixa energia (Figura II.2) e o Titanato de Bário passa de uma estrutura cúbica para uma tetragonal. Como nenhuma posição está no centro da célula unitária, o centro de cargas positivas não coincide com o das cargas negativas, ou seja, tem-se um dipolo elétrico. Embora seja de apenas uma pequena fração de um Angstrom, esse deslocamento é muito maior que os deslocamentos iônicos na maior parte dos sólidos. Isso, associado com a carga 4+ do íon, origina um momento de dipolo elevado para a célula unitária.

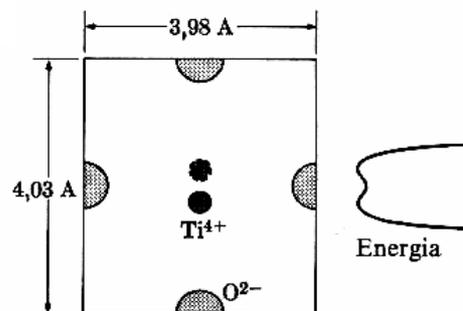


Figura II.2 Estrutura do BaTiO<sub>3</sub>, com destaque para o deslocamento do Ti<sup>4+</sup> para posições de baixa energia, na presença de um campo elétrico (modificado de Van Vlack, 1964).

A barreira de energia entre as duas posições possíveis para o íon Ti<sup>4+</sup> é suficientemente baixa, para que o mesmo possa se mover de uma para outra, sob ação de um campo elétrico (Figura II.2). Este campo elétrico não é necessariamente externo, mas pode ser o campo dos dipolos da próxima célula unitária. É comum encontrar células unitárias espontaneamente arranjadas, de forma a resultar em dipolos elétricos paralelos. Além disso, a polaridade de um grupo de células unitárias, que é denominado domínio, pode ser mantida por um certo

período de tempo, pois necessita-se de energia para mover o íon  $Ti^{4+}$  de sua posição de baixa energia. Essa propriedade de alinhamento orientado dos dipolos elétricos recebe o nome de ferroeletricidade, VAN VLACK (1964).

**Materiais cerâmicos piezoelétricos** – Estes estão entre aqueles materiais ferroelétricos cujos centros de cargas positivas e negativas não coincidem. Esse tipo de material, por exemplo, o quartzo ou o  $BaTiO_3$  (Figura II.2), se alonga ou se contrai submetido a um campo elétrico alternado, pois os comprimentos dos dipolos são alterados por gradientes de tensão elétrica. Essa é uma forma de se transformar energia elétrica em mecânica, pois o cristal vibra com a frequência do campo alternado aplicado e com intensidade proporcional à tensão elétrica.

O processo inverso, ou seja, a conversão de energia mecânica em elétrica, pode ser realizada aplicando tração ou compressão mecânica em um material deste tipo. Os dipolos elétricos são deslocados de suas posições de equilíbrio e a distribuição de carga ao longo do cristal é alterada. Desta forma, pode-se transformar ondas sonoras, vibrações e outros movimentos mecânicos em potenciais elétricos. A quantidade de carga desenvolvida depende da distorção cristalina, VAN VLACK (1964).

## II. 5. 1 DOMÍNIOS

Os materiais ferroelétricos possuem dois ou mais estados assimétricos estáveis, entre os quais eles podem ser comutados (chaveados) por um campo elétrico suficientemente intenso. Os dipolos espontâneos agrupam-se em domínios ferroelétricos, que são as regiões do material em que os dipolos de células unitárias adjacentes têm a mesma direção, apresentando, então, polarização espontânea uniforme.

O redirecionamento de um domínio não modifica a rede do cristal, apenas causa distorção nas paredes do domínio, ARNOLD (1995). As paredes do domínio são estruturas que delimitam os domínios. Logo, quando um material é submetido a algum esforço de ordem elétrica ou mecânica as mesmas se movem. O comportamento geral de um cristal é dependente do ordenamento dos domínios, que por sua vez sofrem influência da

temperatura e de campos elétricos e ações mecânicas externas. Este comportamento é descrito pela somatória dos efeitos de cada domínio do cristal.

Outro fator importante na configuração dos domínios é a força elástica entre os domínios, que correspondem à relação entre as tensões mecânicas aplicadas nos eixos e suas respectivas deformações nos mesmos eixos, com deslocamento de cargas constantes. Estas forças influem no agrupamento dos domínios, pois a resposta a forças externas depende de como se dá o arranjo geométrico dos mesmos, ARNOLD (1995).

## II. 6 POLARIZAÇÃO

Inicialmente, nas cerâmicas ferroelétricas, os domínios elétricos estão orientados de forma aleatória (Figura II.3 (a)). Portanto, há a necessidade de se alinhar os domínios elétricos da cerâmica fazendo com que a contribuição dos mesmos seja construtiva. Se esta cerâmica também possuir características piezoelétricas, esta piezoeletricidade resultante será muito pequena ou nula, até a cerâmica ser polarizada, PHILLIPS (1997), BUTTON (1998), Figura II.3 (b).

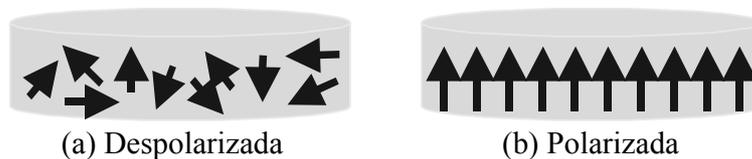


Figura II.3 Orientação dos dipolos na cerâmica ferroelétrica, (a) despolarizada e (b) polarizada

O material cerâmico ferroelétrico, depois de polarizado, apresenta na sua simetria um eixo de rotação de ordem infinita na direção da polarização e infinitos planos de simetria paralelos a esta direção. Este grupo de simetria permite a diferenciação entre uma face de polaridade positiva e uma face de polaridade negativa. É representado por  $\infty mm$  e apresenta os parâmetros da classe 6mm. Todo material cerâmico ferroelétrico depois de polarizado pertence ao grupo  $\infty mm$ , independente de classe, em relação às propriedades físicas macroscópicas que dependem de direção, IBRAHIM (1991).

A polarização é o processo utilizado para alinhar os domínios da cerâmica segundo um eixo. Neste método um campo elétrico DC é aplicado nos terminais da cerâmica fazendo com que os domínios tentem se alinhar na direção deste campo (a eficiência deste alinhamento irá variar de acordo com a simetria do cristal e das impurezas contidas no mesmo, sabendo-se que este alinhamento possuirá domínios com pequenos ângulos defasados devido à não total mobilidade dos mesmos) BUTTON (1998), JORDAN (2001). Este campo DC tem que ser intenso o suficiente para superar o campo coercitivo da cerâmica ( $E_c$ , Figura II.4), revertendo assim, a polarização espontânea da cerâmica. A curva de histerese representa o processo de polarização da cerâmica piezoelétrica em função do campo aplicado.

Considerando um material ferroelétrico contendo muitos domínios alinhados ao acaso. Ao se aplicar um campo elétrico externo, as fronteiras entre os domínios vão se mover de forma que os orientados mais favoravelmente se expandem e os orientados menos favoravelmente se contraem. Isto origina uma polarização total não nula que aumenta rapidamente, tal como mostra a parte O-A da Figura II.4. Como o alinhamento tende a um máximo, atinge-se uma situação na qual o aumento adicional no campo elétrico apenas melhora ligeiramente a polarização preferencial; isto corresponde à parte A-B da Figura II.4. A remoção do campo elétrico externo não elimina totalmente a polarização preferencial, de forma que uma polarização remanescente ( $P_R$ ), é mantida; até que se aplique um campo coercitivo ( $E_c$ ), de polaridade oposta, o material não perde a sua polarização. A aplicação dos campos cíclicos produz um ciclo de histerese, conforme mostra a Figura II.4, VAN VLACK (1964), IBRAHIM (1991).

No caso do Titanato de Bário, tem-se um ponto de Curie ferroelétrico a  $120^\circ\text{C}$ , temperatura na qual perde-se a polarização espontânea das células unitárias adjacentes, em virtude da passagem para a forma cúbica. Embora novos domínios se formem espontaneamente, ao se resfriar o Titanato de Bário abaixo de  $120^\circ\text{C}$ , estes não têm um alinhamento preferencial, até que seja aplicado um campo elétrico externo, VAN VLACK (1964).

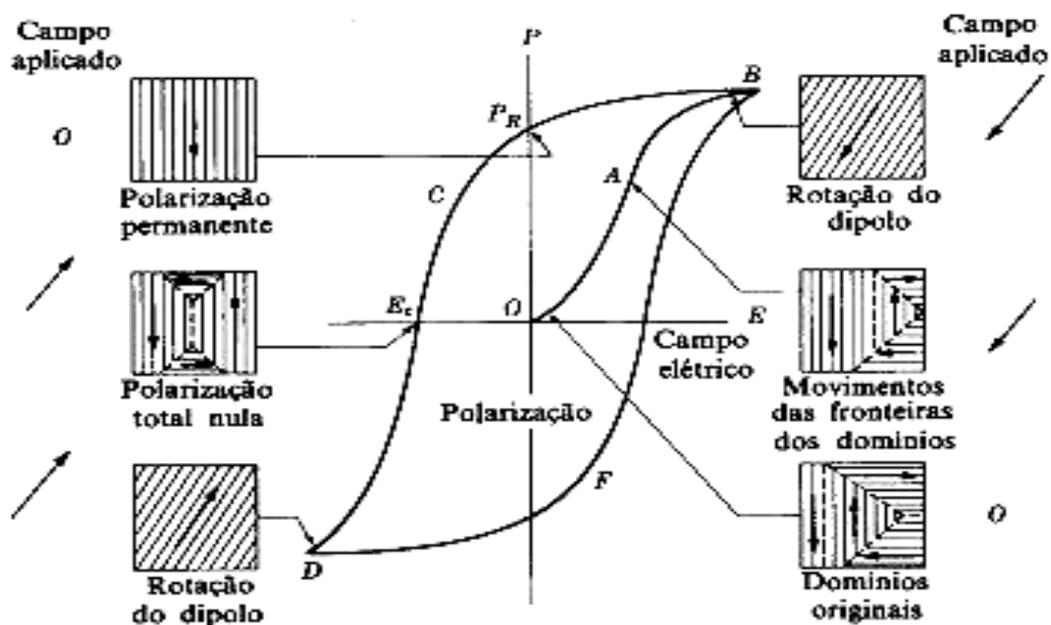


Figura II.4 Curva de histerese e direcionamento dos domínios ferroelétricos durante aplicação de um campo elétrico – polarização (P) versus campo elétrico aplicado (E) de cerâmica piezoelétrica. ( $P_R$ ) é a polarização remanescente e ( $E_c$ ) é o campo coercitivo (modificado de Van Vlack, 1964).

Experimentos realizados por HOOKER (1998), mostraram a variação da polarização (curva de histerese) no PZT-5A em relação à temperatura (Figura II.5). Nota-se um campo coercitivo ( $E_c$ ) pequeno a temperaturas muito baixas e queda deste campo conforme há aumento da temperatura, acima de  $-100^\circ\text{C}$ . Observa-se também o aumento da polarização de saturação ( $P_{sat}$ ) e da polarização remanescente ( $P_R$ ) para temperaturas positivas e também, que a polarização remanescente acompanha a polarização de saturação.

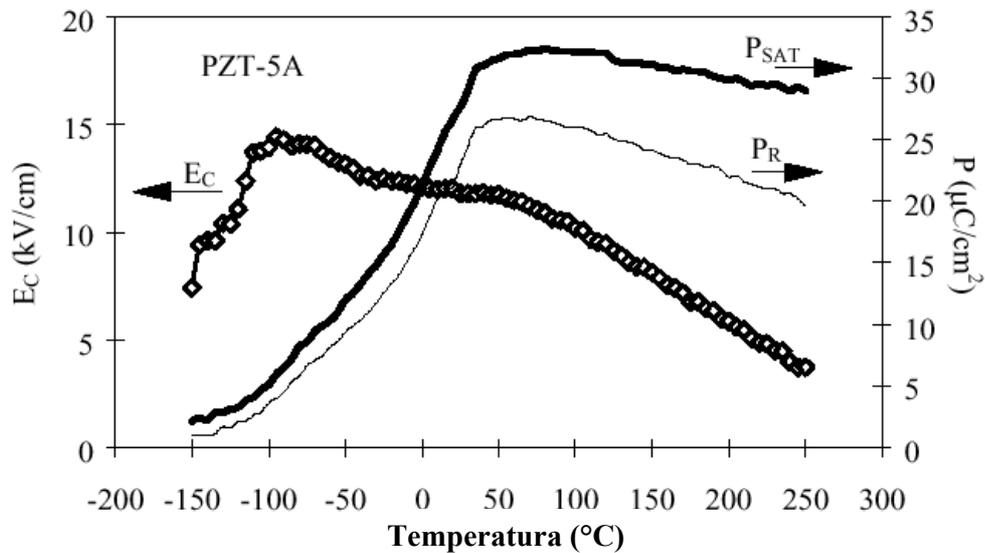


Figura II.5 Variação da polarização no PZT-5A em relação à temperatura, onde ( $E_c$ ) é o campo coercitivo, ( $P_r$ ) polarização remanescente e ( $P_{sat}$ ) polarização de saturação (modificado de Hooker, 1998).

Completando os trabalhos para o PZT-5A, HOOKER (1998) obteve as curvas típicas de histerese para determinadas temperaturas ( $-150^{\circ}\text{C}$ ,  $-75^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$  e  $250^{\circ}\text{C}$ ). Estas curvas são mostradas na Figura II.6.

As curvas de histerese do PZT-5A da Figura II.6, mostram que para temperaturas negativas a polarização resultante é baixa, porém com o aumento da temperatura ( $25^{\circ}$ ,  $100^{\circ}$  e  $250^{\circ}$ ) HOOKER (1998) obteve polarizações consideráveis e conforme houve o aumento da temperatura, observando o estreitamento da curva de histerese, menor quantidade de energia (kV/cm) foi necessária para obter a mesma polarização.

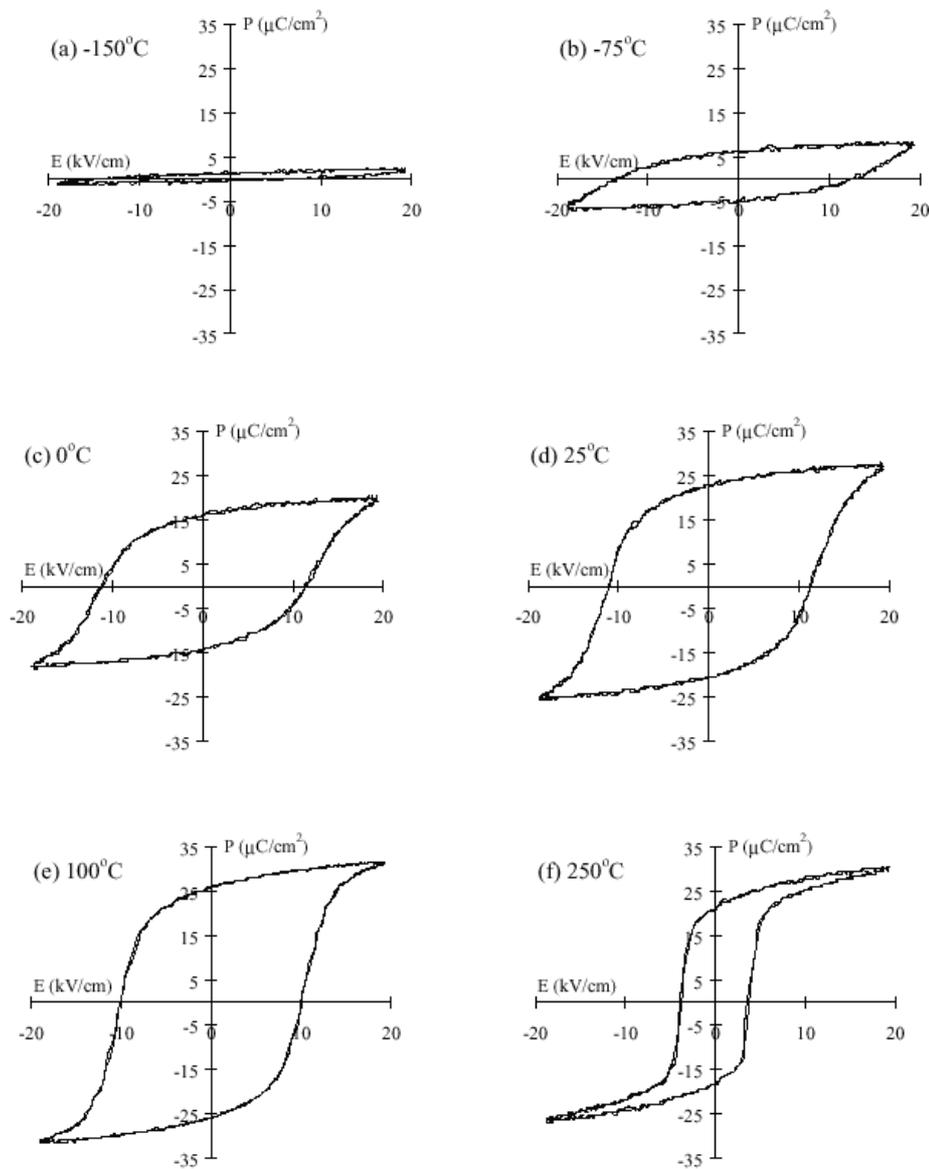


Figura II.6 Curvas típicas de histeresse para o PZT-5A para temperaturas, (a)  $-150^{\circ}\text{C}$ , (b)  $-75^{\circ}\text{C}$ , (c)  $0^{\circ}\text{C}$ , (d)  $25^{\circ}\text{C}$ , (e)  $100^{\circ}\text{C}$  e (f)  $250^{\circ}\text{C}$  (modificado de Hooker, 1998)

Experimentos realizados por BRITAIN e WEIGHT (1987) relacionaram o campo elétrico DC de polarização da cerâmica com a espessura da mesma e concluíram que  $2\text{kV/mm}$  de espessura representa um resultado satisfatório, pois campos aplicados acima deste valor, apresentam uma melhora não-expressiva na polarização da cerâmica piezoelétrica.

A temperatura é outro fator importante no processo de polarização. Durante a polarização da cerâmica, a mesma deve ser aquecida até uma temperatura próxima ao ponto de Curie, ou ponto de Curie-Weiss, e então submetida a um campo elétrico DC intenso. O ponto de Curie é a temperatura na qual a polarização espontânea desaparece no material ferroelétrico. Quando o elemento cerâmico é colocado acima do ponto Curie, todas suas propriedades piezoelétricas se perdem. Cada composição de cerâmica piezoelétrica possui um ponto de Curie diferente.

Antes e próximo ao Ponto de Curie, a temperatura atinge o ponto de Curie-Weiss que é quando, na cerâmica ferroelétrica, ocorre a transição da fase ferroelétrica (polar) para a fase paraelétrica (não polar). Nesta fase, através da aplicação de um campo elétrico externo, pode-se induzir uma polarização elétrica devido à facilidade de alinhamento dos dipolos, BUTTON (1998), JORDAN (2001).

A relação da dependência entre a temperatura e a polarização espontânea é mostrada na Figura II.7 para o titanato de bário. Neste gráfico nota-se três descontinuidades: no Ponto de Curie, em  $T_c=120^\circ\text{C}$ , devido à transição da fase ferroelétrica para a paraelétrica e, em  $5^\circ\text{C}$  e em  $-70^\circ\text{C}$  em função da transição de uma fase ferroelétrica para outra. Cada fase de transição é acompanhada por uma alteração na estrutura. Acima do Ponto de Curie, a estrutura é cúbica, MERZ e FATUZZO (1967).

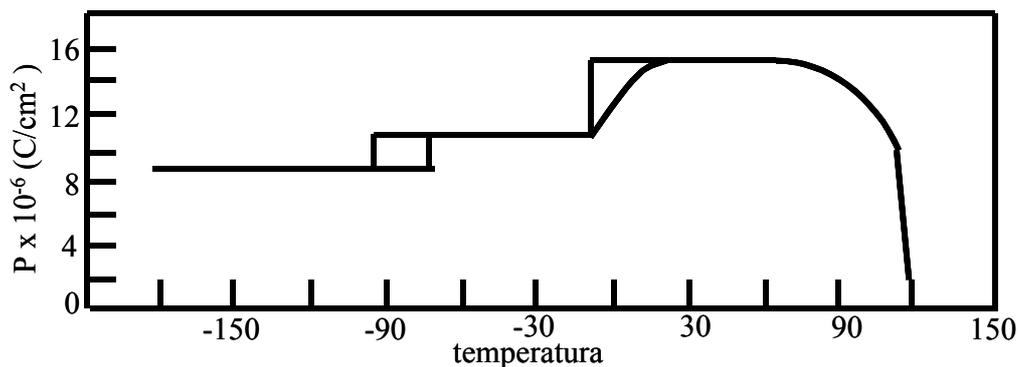


Figura II.7 Relação entre temperatura e polarização espontânea no BaTiO<sub>3</sub> (modificado de Merz, 1949).

Relacionando a temperatura com a curva de histerese, conforme está indicado na Figura II.8, observa-se que o aumento da temperatura causa o estreitamento da curva de histerese, como foi confirmado por HOOKER (1998) para o PZT-5A. Lembrando que a área interna da curva de histerese representa a quantidade de energia gasta para polarizar a cerâmica, podemos concluir que quanto maior a temperatura, menos energia é utilizada e ao se atingir o Ponto de Curie (transição de uma fase ferroelétrica para uma fase paraelétrica), teoricamente, qualquer campo aplicado polariza a cerâmica, como também, mantendo esta temperatura e retirando o campo aplicado, a polarização remanescente seria nula, KINGERY, BOWEN e UTTLMANN (1976), IBRAHIM (1991).

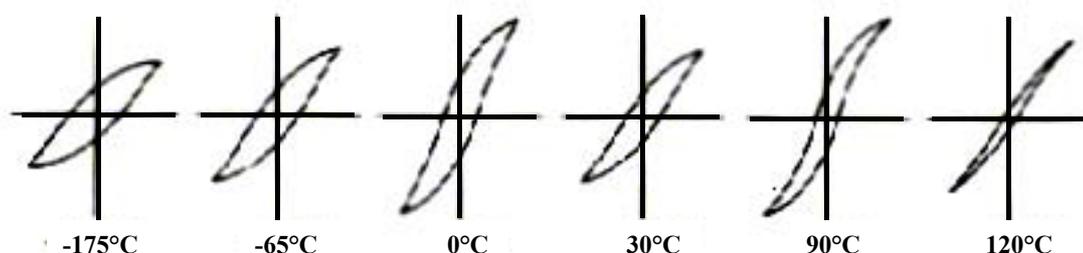


Figura II.8 Relação da temperatura com a curva de histerese – BaTiO<sub>3</sub> (modificado de Kingery, 1976).

### II.6.1 MOVIMENTOS ATÔMICOS E VIBRAÇÕES TÉRMICAS

Os átomos, em um cristal, somente ficam estáticos na temperatura de zero absoluto ou em zero graus Kelvin (-273°C). Nestas condições, os átomos permanecem na posição correspondente ao mínimo de energia. Conforme a temperatura se eleva, as vibrações térmicas dispersam ao acaso os átomos em torno da posição de menor energia. Movimentos atômicos para novas posições serão observados, se a temperatura ou campo aplicado for suficiente para fornecer a energia necessária para retirar o átomo da sua posição original do reticulado. Temperaturas mais altas fornecem energia adicional aos elétrons, VAN VLACK (1964).

## II.6.2 RESISTÊNCIA FÍSICA DA CERÂMICA

A cerâmica piezoelétrica possui um limite para aplicação de campo elétrico. Um campo aplicado acima deste limite pode causar a quebra do material cerâmico, que funciona como um material dielétrico, principalmente se o mesmo apresentar falhas na sua estrutura cristalina. A intensidade do campo elétrico que pode causar a quebra do material foi apresentada em JAFFE, COOK Jr. e JAFFE (1971), que foi um postulado, desenvolvido por GERSON e MARSHALL (1959), de distribuição de falhas no volume da cerâmica, para cálculo de tensão de quebra em função da porosidade, relacionando a espessura do material e o formato do eletrodo de polarização.

Para efeito de espessura, os experimentos realizados resultaram na seguinte expressão:

$$E = 27,2 t^{(-0,39)} \quad (\text{II.1})$$

Onde:

$t$  = espessura da cerâmica em cm

$E$  = campo elétrico de rompimento do dielétrico em kV/cm.

## II.7 EQUAÇÕES DA PIEZOELETRICIDADE

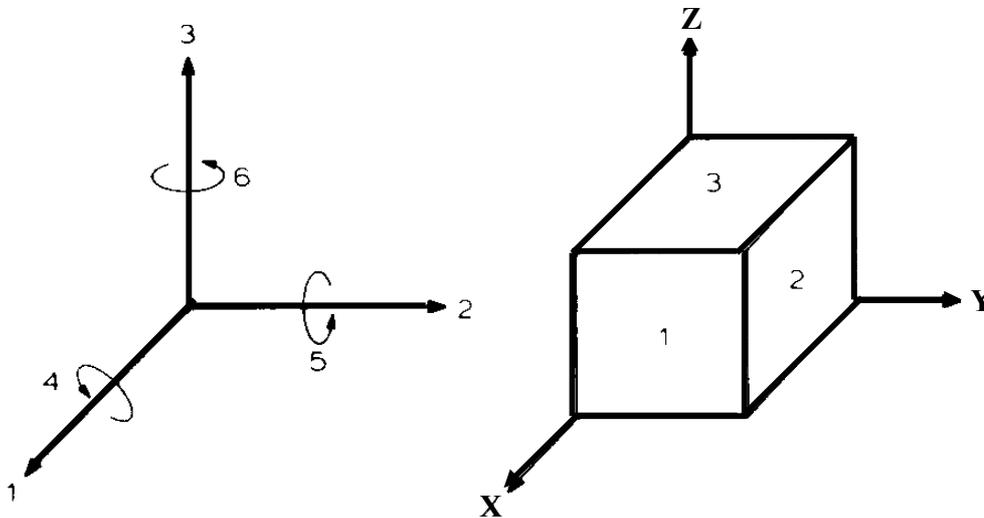


Figura II.9 Notação de eixos para um sólido de cerâmica polarizada  
(Modificado de Angelotti, 1982)

A direção de polarização em um material piezoelétrico normalmente coincide com a direção do eixo Z. Em um disco de cerâmica piezoelétrica com espessura menor que o diâmetro, a direção do campo elétrico de polarização é ao longo da espessura.

Um sistema ortogonal de eixos X, Y e Z, junto com um pequeno cubo sólido de material piezoelétrico de faces 1, 2 e 3 perpendiculares a X, Y e Z respectivamente é ilustrado na Figura II.9.

Uma força aplicada a uma das faces do cubo sofre uma decomposição ao longo dos eixos X, Y e Z, ou nas forças de cisalhamento 4, 5 e 6, atuando ao redor dos eixos 1, 2 e 3.

Um campo elétrico aplicado ao cubo pode ser decomposto em suas componentes ao longo dos eixos X, Y e Z, e qualquer carga resultante deste campo ou do efeito piezoelétrico aparecerá nas faces 1, 2 e 3. Como resultado da aplicação de uma força há seis maneiras pelas quais uma deformação pode ocorrer, isto é, tração ou compressão ao longo dos três eixos ou cisalhamento ao redor dos eixos, ANGELOTTI (1982), SILVA (1993).

Em um cristal que não seja piezoelétrico, as relações de deformação física com a tensão mecânica aplicada independem do comportamento de um campo elétrico aplicado ou de um esforço mecânico em ação.

Pode-se considerar um disco de cerâmica piezoelétrica com eletrodos metálicos depositados em ambas as faces planas, como um capacitor: a cerâmica representa o dielétrico e os eletrodos as placas. Partindo da equação para dielétricos comuns temos;

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{t} = \frac{\epsilon A}{t} \quad (\text{II.2})$$

e

$$Q = C V \rightarrow Q = \frac{\epsilon A V}{t} \quad (\text{II.3})$$

Onde:

C = capacitância

A = área do eletrodo do capacitor

$\epsilon_r$  = constante dielétrica relativa

$\epsilon_0$  = constante dielétrica do ar =  $8.85 \times 10^{-12}$  Faraday / metro

$\epsilon$  = constante dielétrica

V = tensão elétrica

t = espessura do dielétrico

Q = carga

Assim, podemos definir o deslocamento elétrico ( $D$ ) como a densidade de carga, ou a relação de carga para a área do capacitor, PHILLIPS (1997).

$$D = \frac{Q}{A} = \frac{\epsilon V}{t} \quad (\text{II.4})$$

O campo elétrico ( $E$ ) e o deslocamento elétrico podem ser calculados como:

$$E = \frac{V}{t} \quad e \quad D = \epsilon E \quad (\text{II.5})$$

Estas equações representam o comportamento de dielétricos isotrópicos. A cerâmica piezoelétrica no estado não polarizado é isotrópica. Passa a ser anisotrópica quando é polarizada. Em um material anisotrópico, tanto o campo elétrico quanto o deslocamento elétrico precisam ser representados por vetores com três dimensões em uma maneira semelhante ao vetor de deslocamento mecânico. Isto é um resultado direto da relação do deslocamento elétrico ( $D$ ) com o campo elétrico aplicado ( $E$ ), na orientação do disco cerâmico capacitivo com o eixo da cerâmica polarizada. Isto significa que a equação geral do deslocamento elétrico ( $D$ ) pode ser descrita como uma equação de variáveis de estado, PHILLIPS (1997):

$$D_i = \epsilon_{ij} E_j \quad (\text{II.6})$$

Onde:

$i$  = direção do vetor deslocamento elétrico

$j$  = direção do vetor campo elétrico

$ij$  = vetor referente a direção elétrica e a direção mecânica respectivamente

Na cerâmica polarizada o deslocamento elétrico ocorre sempre em paralelo ao campo elétrico. Assim cada vetor de deslocamento elétrico,  $D_i$ , é igual à soma dos vetores de

campo elétrico,  $E_j$ , multiplicados pelas constantes dielétricas correspondentes,  $\epsilon_{ij}$ , PHILLIPS (1997), JORDAN (2001):

$$D_1 = \epsilon_{11} E_1 + \epsilon_{12} E_2 + \epsilon_{13} E_3 \quad (\text{II.7.1})$$

$$D_2 = \epsilon_{21} E_1 + \epsilon_{22} E_2 + \epsilon_{23} E_3 \quad (\text{II.7.2})$$

$$D_3 = \epsilon_{31} E_1 + \epsilon_{32} E_2 + \epsilon_{33} E_3 \quad (\text{II.7.3})$$

A maioria das constantes dielétricas para a cerâmica piezoelétrica polarizada (ao contrário dos cristais piezoelétricos isotrópicos) é igual a zero. As constantes diferentes de zero são, PHILLIPS (1997):

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} , \epsilon_{33}$$

Em analogia às equações que descrevem o comportamento elétrico de um capacitor, as equações que descrevem o comportamento mecânico se relacionam:

$$T = \frac{F}{A} \quad (\text{II.8})$$

$$S = \frac{\delta}{L} \quad (\text{II.9})$$

Onde:

T = tensão mecânica de compressão ou tração (*stress*)

S = deformação mecânica (*strain*)

F = força aplicada

A = área a qual a força é aplicada

$\delta$  = alongamento

L = comprimento do material (em relação ao eixo de vibração)

A relação entre tensão aplicada (*stress*) e deformação mecânica (*strain*) é descrita pela Lei de Hooke, a qual diz que dentro dos limites elásticos do material a tensão é proporcional à deformação, PHILLIPS (1997):

$$S = Y T \quad (\text{II.10})$$

Y = Módulo de elasticidade ou módulo de Young

ou, para materiais anisotrópicos:

$$S_i = Y_{ij} T_j \quad (\text{II.11})$$

Onde os coeficientes **i** e **j** indicam a orientação das propriedades.

Em um material piezoelétrico, tanto a deformação mecânica quanto o deslocamento elétrico resultantes dependem até certo ponto da tensão mecânica ou do campo elétrico aplicados.

As equações constitutivas que descrevem o comportamento do material piezoelétrico, incluem a deformação mecânica (*strain*) e o deslocamento elétrico nas três direções ortogonais causados pelo efeito de um campo elétrico aplicado ou da tensão mecânica aplicada (*stress*), JAFFE, COOK Jr. e JAFFE (1971), BUTTON (1998), JORDAN (2001).

$$\{D\} = [\epsilon]^T \{E\} + [d] \{S\} \quad (\text{Efeito piezoelétrico direto}) \quad (\text{II.12})$$

$$\{S\} = [d] \{E\} + [s]^E \{T\} \quad (\text{Efeito piezoelétrico inverso}) \quad (\text{II.13})$$

Onde:

$\{D\}$  = vetor deslocamento elétrico ou densidade de fluxo elétrico

$[\epsilon]$  = matriz dielétrica ou permissividade elétrica  
 $\{E\}$  = vetor campo elétrico  
 $\{S\}$  = tensor deformação mecânica  
 $[d]$  = constante piezoelétrica  
 $\{T\}$  = tensor tensão mecânica  
 $[s]$  = matriz constante elástica ou compliância elástica (relaciona tensão mecânica, deformação mecânica e o campo elétrico aplicado)

Um tensor normalmente é utilizado para relacionar matematicamente propriedades físicas, IBRAHIM (1991). O sobrescrito é usado para indicar que uma propriedade é medida enquanto outra é mantida constante. Os subscritos relacionam as direções das variáveis elétrica (campo elétrico ou deslocamento dielétrico) e mecânica (tensão de tração ou de compressão).

A isotropia inicial da cerâmica piezoelétrica é alterada na direção do campo elétrico de polarização, mantendo, porém, a isotropia nos planos normais a ele. Os elementos de simetria das cerâmicas ferroelétricas polarizadas são: 1 eixo de rotação de ordem infinita na direção da polarização e infinitos planos paralelos a ele, como planos de reflexão, JAFFE, COOK Jr. e JAFFE (1971).

Após a polarização, em relação às constantes elásticas, elétricas e piezoelétricas, a simetria da cerâmica é cilíndrica (classe  $\infty mm$ , infinitos eixos de rotação) independentemente da classe a que sua célula unitária pertença. A matriz de estados é equivalente à da classe  $6mm$  do sistema hexagonal, onde apenas 10 termos são diferentes de zero, IBRAHIM (1991), BUTTON (1998), JORDAN (2001).

As matrizes das constantes elástica, dielétrica e piezoelétrica, para a cerâmica polarizada (PZT) de simetria cilíndrica, são apresentadas na Tabela II.2, JORDAN (2001).

Tabela II.2 Constantes elásticas, dielétricas (permissividade elétrica) e piezoelétricas para um material piezoelétrico polarizado (Modificado de Jordan, 2001).

Constante elástica ou compliância elástica					
$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	0	0	0
$S_{12}$	$S_{11}$	$S_{13}$	0	0	0
$S_{13}$	$S_{13}$	$S_{33}$	0	0	0
0	0	0	$S_{44}$	0	0
0	0	0	0	$S_{44}$	0
0	0	0	0	0	$2(S_{11} - S_{12})$

Permissividade elétrica		
$\epsilon_1$	0	0
0	$\epsilon_1$	0
0	0	$\epsilon_3$

Constante piezoelétrica					
0	0	0	0	$d_{15}$	0
0	0	0	$d_{15}$	0	0
$d_{31}$	$d_{31}$	$d_{33}$	0	0	0

Os subscritos definem a orientação das propriedades. A direção 3 é tomada como o eixo de polarização e as direções 1 e 2 como os eixos ortogonais. Efeitos de cisalhamento são indicados por 4, 5 e 6. Coeficientes que relacionam 2 variáveis são indicados com 2 subscritos. O primeiro referente à direção elétrica (do campo elétrico ou do deslocamento elétrico) e o segundo a direção mecânica (tensão de tração ou de compressão).

Assim, o conjunto de equações de estado para a cerâmica piezoelétrica é:

$$D_1 = \varepsilon_1 E_1 + d_{15} T_5 \quad (\text{II.14})$$

$$D_2 = \varepsilon_2 E_2 + d_{15} T_4 \quad (\text{II.15})$$

$$D_3 = \varepsilon_3 E_3 + d_{31} (T_1 + T_2) + d_{33} T_3 \quad (\text{II.16})$$

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \quad (\text{II.17})$$

$$S_2 = s_{11}^E T_2 + s_{12}^E T_1 + s_{13}^E T_3 + d_{31} E_3 \quad (\text{II.18})$$

$$S_3 = s_{13}^E (T_1 + T_2) + s_{33}^E T_3 + d_{33} E_3 \quad (\text{II.19})$$

$$S_4 = s_{44}^E T_4 + d_{15} E_2 \quad (\text{II.20})$$

$$S_5 = s_{44}^E T_5 + d_{15} E_1 \quad (\text{II.21})$$

Este conjunto de equações para um cristal do sistema hexagonal – classe 6mm, pode ser resumido em uma matriz 9x9, onde cada coluna refere-se a um componente elástico ou de campo elétrico como variável independente e cada linha refere-se a um componente de deformação mecânica ou deslocamento dielétrico como variável independente da seguinte forma:

$$\begin{vmatrix} D1 \\ D2 \\ D3 \\ S1 \\ S2 \\ S3 \\ S4 \\ S5 \\ S6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} K1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & K1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K3 & d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} E1 \\ E2 \\ E3 \\ T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \\ T5 \\ T6 \end{vmatrix}$$

$K_1$  e  $K_3$  = são as constantes dielétricas relativas, ou seja, constantes dielétricas adimensionais que relacionam a constante dielétrica do material com a do vácuo.

## II.7.1 PARÂMETROS PIEZOELÉTRICOS

Os parâmetros de interesse, quando consideramos os efeitos eletromecânicos no material piezoelétrico, são: os coeficientes de carga piezoelétricos “ $d_{31}$  e  $d_{33}$ ”, os coeficientes de tensão elétrica piezoelétricos “ $g_{31}$  e  $g_{33}$ ” e os fatores de acoplamento piezoelétricos “ $k_{31}$  ou  $k_p$  (planar)” e “ $k_{33}$  ou  $k_t$  (espessura)”. O coeficiente piezoelétrico “ $d$ ” é uma constante de proporcionalidade entre o deslocamento elétrico e a tensão mecânica, ou entre a deformação e o campo aplicado. Altos coeficientes piezoelétricos “ $d$ ” são desejáveis nos materiais utilizados em aplicações vibracionais. Os coeficientes de tensão elétrica piezoelétricos “ $g$ ” estão relacionados aos coeficientes “ $d$ ” e são expressos matematicamente por:

$$d_{mi} = \epsilon_{nm}^T g_{ni} \quad (\text{II.22})$$

Onde:

$$m, n = 1, 2, 3$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

Altos coeficientes de tensão elétrica piezoelétricos “ $g$ ” são desejáveis em materiais que serão utilizados para produzir tensão elétrica em resposta a tensões mecânicas aplicadas, JORDAN (2001).

Nas cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT), empregadas na construção de transdutores de ultra-som, as propriedades dielétricas são importantes para o seu desempenho. A constante dielétrica “ $\epsilon$ ” medida em Faraday/metro é uma medida da carga armazenada entre os eletrodos em um material dielétrico e é função da tensão elétrica aplicada. As constantes dielétricas relativas “ $K_1$  e  $K_3$ ” são adimensionais e relacionam a

permissividade do material com a do vácuo ( $\epsilon_0=8,85 \times 10^{-12}$  Faraday/metro), nas direções dos eixos 1 e 3, respectivamente JORDAN (2001):

$$K_1 = \frac{\epsilon_{11}}{\epsilon_0} \quad (\text{II.23})$$

e

$$K_3 = \frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_0} \quad (\text{II.24})$$

Aplicando-se um campo elétrico alternado entre os eletrodos do material dielétrico, a constante dielétrica terá uma parte real e outra imaginária. O fator de dissipação na cerâmica piezoelétrica é definido pela tangente do ângulo de perda (relação da parte real com a parte imaginária) e matematicamente é expresso por, JORDAN (2001), KINGERY, BOWEN e UTTLMANN (1976):

$$\tan\delta = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} \quad (\text{II.25})$$

Onde:

$\epsilon'$  = componente real e

$\epsilon''$  = componente imaginário da permissividade complexa.

Os experimentos realizados por HOOKER (1998) sobre a influência da frequência e da temperatura na constante dielétrica e no fator de dissipação para PZT-4 e PZT-5A apresentaram os resultados mostrados na Figura II.10:

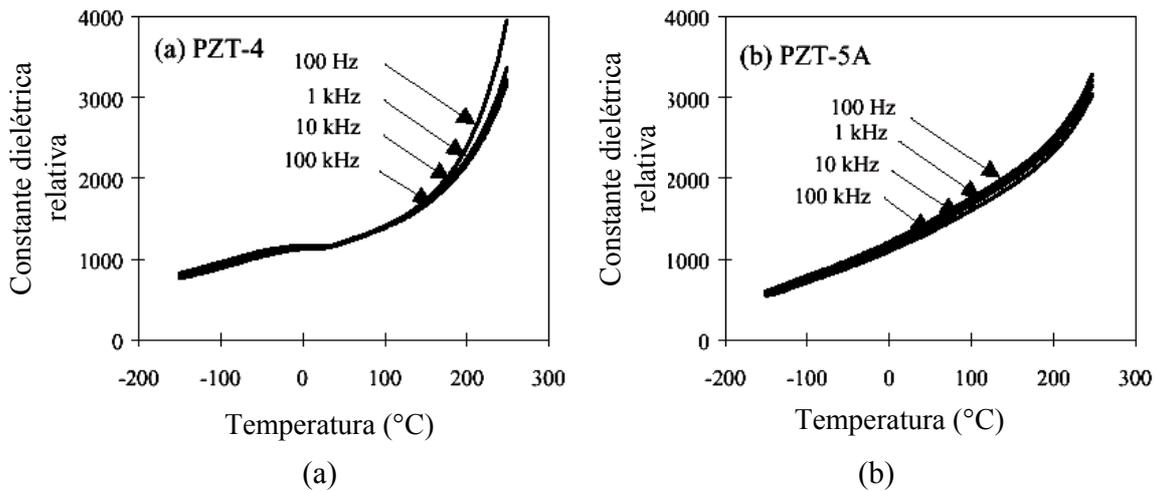


Figura II.10 Variação das constantes dielétricas em relação a temperatura do (a) PZT-4 e (b) PZT-5A (modificado de Hooker, 1998).

Nota-se que a constante dielétrica do PZT-4, a partir de 100°C, aumenta mais abruptamente em relação à temperatura que a constante dielétrica do PZT-5A. Nas frequências ensaiadas, a constante dielétrica variou de modo semelhante com o aumento a temperatura, para cada tipo de cerâmica.

O valor do fator de dissipação ou perda dielétrica está relacionado à composição do PZT, HOOKER (1998), JORDAN (2001). Na Figura II.11 observa-se que  $\tan\delta$  para o PZT-4 é aproximadamente nula para medidas realizadas até 125°C, nas frequências 100Hz, 1kHz, 10kHz e 100kHz. Em 100 Hz e 1 kHz, porém, o fator de dissipação começa a aumentar a 125°C e 150°C, respectivamente. Para o PZT-5A os valores do fator de dissipação são relativamente constantes com a temperatura, quando medidos nas frequências de 100Hz, 1kHz, 10kHz e 100kHz. Porém, em 100kHz, as perdas dielétricas são significativamente mais altas, que nas outras frequências, para a faixa de temperatura medida, HOOKER (1998).

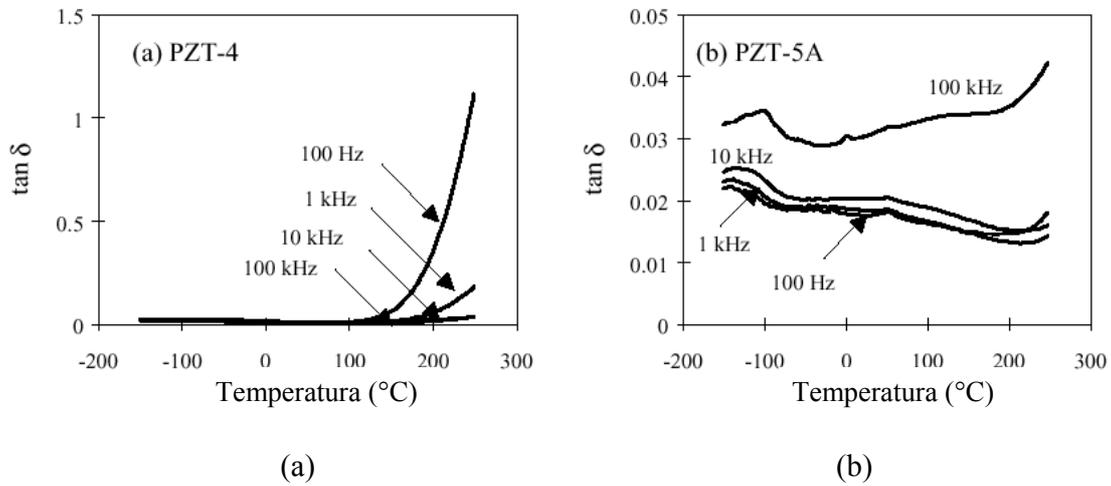


Figura II.11 (a) Variação do fator de dissipação em relação à temperatura e à frequência (a) PZT-4 e (b) PZT-5A – (Modificado de Hooker, 1998)

Os coeficientes de acoplamento eletromecânico mais comuns para um disco de cerâmica são  $k_p$  (planar), e  $k_{33}$  (espessura). A seguir são apresentadas as equações para o cálculo de  $k_{31}$  e  $k_{33}$ , necessárias também para cálculo de outras constantes piezoelétricas. Um aprofundamento maior sobre o acoplamento eletromecânico será apresentado mais adiante, neste capítulo.

Para calcular o fator de acoplamento eletromecânico do modo longitudinal ou espessura, utiliza-se a Equação (II.26), HOOKER (1998):

$$k_{33}^2 = \frac{\frac{\pi}{2}}{1 + \frac{(f_a - f_r)}{f_r}} \tan \left\{ \frac{\frac{\pi (f_a - f_r)}{2f_r}}{1 + \frac{(f_a - f_r)}{f_r}} \right\} \quad (II.26)$$

Onde:  $f_a$  = frequência de anti-ressonância; e  
 $f_r$  = frequência de ressonância

Para calcular o fator de acoplamento eletromecânico do modo planar ou radial, utiliza-se a Equação (II.27), HOOKER (1998):

$$k_{31}^2 = \frac{\Psi}{1 + \Psi} \quad (\text{II.27})$$

Onde  $\Psi$ :

$$\Psi = \frac{\pi}{2} \left( 1 + \frac{(f_a - f_r)}{f_r} \right) \tan \left( \frac{\pi (f_a - f_r)}{2f_r} \right) \quad (\text{II.28})$$

A compliância elástica é a razão das mudanças de dimensão do material em relação ao campo elétrico externo aplicado, e é o inverso do módulo de Young. Para o material piezoelétrico, o valor da compliância depende da direção da deformação, se é paralela ou perpendicular ao eixo de polarização, e das condições de limite elétrico. São expressas pelas equações seguintes:

$$s_{33}^D = \frac{1}{4 \rho f_a^2 t^2} \quad (\text{II.29})$$

$$s_{33}^E = \frac{s_{33}^D}{1 - k_{33}^2} \quad (\text{II.30})$$

$$s_{11}^E = \frac{1}{4 \rho f_r^2 w^2} \quad (\text{II.31})$$

$$s_{11}^D = s_{11}^E (1 - k_{31}^2) \quad (\text{II.32})$$

Onde :

$\rho$  = densidade do material em  $\text{kg} / \text{m}^3$

$t$  = distância entre os eletrodos  
 $w$  = largura da cerâmica  
 $f_r$  = frequência de ressonância  
 $f_a$  = frequência de anti-ressonância

As constantes piezoelétricas “d”, relacionam a deformação mecânica em função do campo elétrico aplicado e podem ser calculadas por equações que utilizam os acoplamentos, os coeficientes elásticos e as constantes dielétricas, HOOKER (1998), JORDAN (2001):

$$d_{33} = k_{33} \sqrt{\epsilon_0 K_3^T s_{33}^E} \quad (\text{II.33})$$

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{\epsilon_0 K_3^T s_{11}^E} \quad (\text{II.34})$$

As constantes de tensão elétrica piezoelétricas “ $g_{33}$  e  $g_{31}$ ” são expressas por:

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_0 K_3^T} \quad (\text{II.35})$$

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_0 K_3^T} \quad (\text{II.36})$$

Os coeficientes piezoelétricos calculados pelas equações (II.29) a (II.36) são válidos apenas para frequências abaixo da ressonância e quando a cerâmica apresenta comportamento linear. Estes coeficientes não são dependentes da dimensão do material, e irão variar de acordo com o grau de polarização da cerâmica. Estes também não provêm a polaridade do coeficiente, tendo que ser determinado através de medidas diretas, JORDAN (2001). A Tabela II.3 mostra as propriedades dielétricas, ferroelétricas e piezoelétricas de

cerâmicas PZT-4, PZT-5A e PZT-5H medidas a temperatura ambiente (25°C), HOOKER (1998).

Tabela II.3 Propriedades dielétricas, ferroelétricas e piezoelétricas de PZT  
(Modificado de Jordan, 2001)

Propriedades	Unidades	PZT-4A	PZT-5A	PZT-5H
K (kHz)	-	1400	1600	3400
$\tan\delta$	-	0.05	0.02	0.02
$E_c$	KV/cm	14.4	11.8	5.5
$P_R$	$\mu\text{C}/\text{cm}^2$	31.0	23.0	12.9
$P_{\text{sat}}$	$\mu\text{C}/\text{cm}^2$	40.1	27.7	19.5
$k_{\text{ef}}$	-	0.49	0.50	0.53
$K_p$	-	0.54	0.56	0.59
$d_{33}(\times 10^{-12})$	m/V	225	350	585
$g_{33}(\times 10^{-3})$	Vm/N	8.5	16.6	12.5
$k_{33}$	-	0.35	0.53	0.59
$d_{31}(\times 10^{-12})$	m/V	-85	-190	-265
$g_{31}(\times 10^{-3})$	Vm/N	-7.5	-13.7	-8.5
$k_{31}$	-	0.22	0.40	0.36
Densidade	$\text{g}/\text{cm}^3$	7.6	7.7	7.4

## II.8 MODOS DE VIBRAÇÃO

A indústria de cerâmicas piezoelétricas usa os eixos ortogonais cristalográficos originais para descrever o modo de operação da cerâmica, onde o eixo 1 corresponde ao eixo X, o eixo 2 ao Y e o 3 ao Z. Normalmente um disco de cerâmica é polarizado na direção do eixo 3, para vibrar preferencialmente no modo longitudinal ou espessura. Quando a cerâmica é excitada para vibrar em um modo principal, parte da energia é acoplada aos outros modos. Para discos cerâmicos, o modo espessura é o mais usado e

outro modo de vibração que ocorre é o radial, EDO CORPORATION ACOUSTIC DIVISION (19-), IBRAHIM (1991).

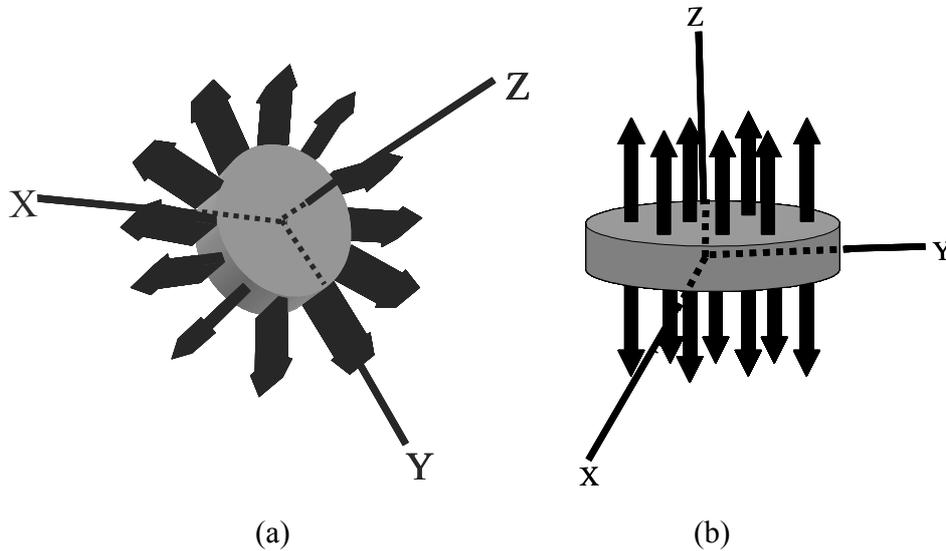


Figura II.12 Modos radial (a) e espessura (b) de vibração de um disco de cerâmica piezoelétrica

O comportamento vibracional de um disco de cerâmica piezoelétrica, polarizada ao longo do eixo  $z$ , geralmente é obtido através de uma análise unidimensional, onde se considera que o disco funciona como um pistão plano, sendo que ao se aplicar uma tensão elétrica entre as faces do disco, o mesmo irá sofrer alteração na sua espessura, mas de forma que suas faces continuem planas. Sabe-se que podem ocorrer outros modos de vibração na cerâmica além do definido pela teoria unidimensional e seus movimentos não se assemelham ao de um pistão plano, BUTTON (1998).

As dimensões físicas da cerâmica influenciam seu modo de vibração; considerando um disco cerâmico, quanto maior a relação diâmetro/espessura, maior a diferença entre os modos radial e espessura, e com isso, o comportamento vibracional do disco mais se aproxima ao de um pistão plano.

## II.8.1 RESSONÂNCIA DE UM CORPO

Ressonância é uma forma de interação entre dois sistemas. Quando um sistema elástico vibra animado por uma onda sonora, diz-se que ele está em ressonância com o som. A onda sonora induz a ressonância em um corpo sob adequada frequência e amplitude. Quando se tenta animar um corpo para que ele vibre, ele reage à alteração do seu estado de equilíbrio em virtude da sua inércia. Ao vibrar, surgem novos componentes resistivos, o atrito entre o móvel e o meio e a elasticidade do meio vibrante, GARCIA (2000).

A massa de um corpo é a medida de sua própria inércia. Ou seja, quanto maior a massa, maior será a reação do corpo às mudanças do estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme. A resistência que a massa oferece ao movimento é chamada de reatância de massa “ $X_m$ ”. Esta é diretamente proporcional à massa “ $m$ ” e à frequência “ $f$ ” de vibração. Então,

$$X_m = 2 \pi f m \quad (\text{II.37})$$

Os esforços de impulsão são amortecidos pelos componentes elásticos, o que dificulta a vibração do sistema em questão. Esta resistência é conhecida como reatância elástica “ $X_e$ ”. Esta é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade “ $Y$ ” do material que constitui o corpo e inversamente proporcional à frequência de vibração, GARCIA (2000). Assim,

$$X_e = \frac{Y}{2 \pi f} \quad (\text{II.38})$$

Nas reatâncias descritas acima, a intensidade das mesmas varia de acordo com a frequência de vibração. Contudo, as reatâncias de massa e elástica variam, entre si, de maneira inversa. Assim, quando a frequência aumenta, a reatância de massa aumenta enquanto que a reatância elástica diminui, GARCIA (2000).

A impedância “Z” é a soma de todos os componentes resistivos e reativos que ocorrem durante a vibração de um sistema material e elástico. Seu módulo é expresso por;

$$|Z| = \sqrt{(X_m - X_e)^2 + R^2} \quad (\text{II.39})$$

Onde:

R = componente puramente resistivo

Baseado na equação acima, a impedância será mínima quando as magnitudes das reatâncias forem iguais, portanto a resistência à vibração será também mínima. Nesta condição, o sistema estará vibrando na sua frequência de ressonância, GARCIA (2000).

## **II.8.2 FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA E DE ANTI-RESSONÂNCIA E COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO ELETRO-MECÂNICO EM UM MATERIAL PIEZOELÉTRICO**

O estado de ressonância de uma estrutura piezoelétrica depende das características intrínsecas do material e das condições de contorno mecânicas e elétricas a que a estrutura esteja submetida.

Considerando um disco de cerâmica vibrando livre as condições de contorno mecânico são nulas e dependendo das condições de contorno elétricas a que um disco esteja submetido, pode ocorrer frequência de ressonância (valores mínimos de impedância da cerâmica sob condição de curto-circuito) e de anti-ressonância (valores máximos de impedância sob condição de circuito aberto), BUTTON (1998).

Os modos de vibração representam os modos ativos piezoelétricos, isto é, os modos que podem ser excitados por um campo elétrico aplicado através dos eletrodos da cerâmica. Cada modo de vibração tem frequência de ressonância e de anti-ressonância associadas e a

separação entre elas é proporcional ao valor do acoplamento eletromecânico do modo, BUTTON (1998).

O coeficiente de acoplamento eletromecânico “k” relaciona a quantidade de energia elétrica aplicada que é transformada em energia mecânica e a quantidade de energia mecânica aplicada que é transformada em elétrica.

O coeficiente efetivo de acoplamento eletromecânico é obtido pela relação entre as frequências de ressonância e a de anti-ressonância, sendo que, quanto maior a diferença entre os valores destas frequências, mais acoplado se encontra este modo de vibração, e maior é a influência deste modo na forma de vibração final da cerâmica e pode ser determinado matematicamente pela Equação (II.40), IEEE STANDARD ON PIEZOELECTRICITY (1987):

$$k_{ef} = \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2} \quad (II.40)$$

Quanto mais acoplado um dado modo de vibração, maior será a separação entre as frequências de ressonância e de anti-ressonância.

Na ressonância, um elemento piezoelétrico pode ser modelado pelo circuito equivalente representado na Figura II.13, MASON (1948), citado por JORDAN (2001). O componente  $C_o$  é adicionado para representar determinadas capacitâncias que podem surgir no circuito, como por exemplo, a capacitância criada pelo elemento piezoelétrico (discos) e os eletrodos depositados entre suas faces, BRISSAUD (1991), JORDAN (2001). O circuito RLC tem suas variáveis alteradas conforme há variações de frequência, que também são em função das medidas da cerâmica. A cerâmica piezoelétrica abaixo da frequência de ressonância e acima da frequência de anti-ressonância possui um comportamento capacitivo, porém entre estas duas frequências, o seu comportamento é indutivo. A cerâmica ideal é a que possui apenas componentes resistivos nas frequências de ressonância e de anti-ressonância. Este modelo somente é válido perto da ressonância. Adicionalmente, a ressonância precisa ser

suficientemente isolada dos outros modos para eliminar os efeitos de qualquer modo adjacente, JORDAN (2001).

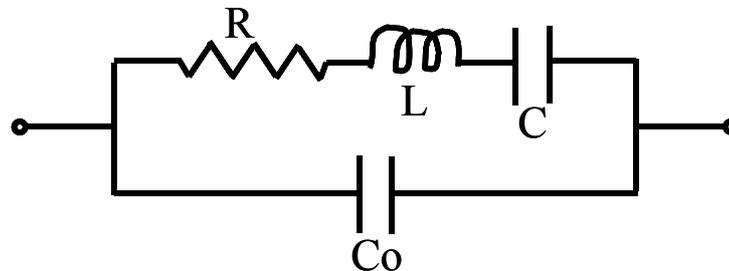


Figura II.13 Circuito Equivalente de Mason representando um elemento piezoelétrico na ressonância (modificado de Mason, 1948)

## II.9 APODIZAÇÃO

O termo apodização pode estar relacionado a duas situações: uma envolve cerâmicas piezoelétricas polarizadas linearmente, mas que são excitadas não-uniformemente; a outra envolve cerâmicas polarizadas não-uniformemente, mas que são excitadas linearmente.

A apodização na excitação é realizada geralmente com a utilização de eletrodos formatados de uma face ou em ambas as faces da cerâmica, por exemplo, eletrodos em forma de anéis, que podem ser excitados com tensões diferentes, ou com as mesmas tensões, porém com defasagem temporal. Os campos acústicos formatados geram ondas gaussianas, de Bessel e ondas X, mesmo sendo geradas por elementos polarizados convencionalmente. Um campo gaussiano é aquele que possui uma distribuição de amplitudes na fonte segundo a função de Gauss e este, não apresenta ao longo do eixo, oscilações de amplitude no campo próximo e nem no campo distante e também não apresenta lobos laterais. Porém, espalha-se consideravelmente após a distância de Rayleigh. Um campo de Bessel possui um lobo central que não apresenta decaimento e cujo pico de intensidade oscila em torno do valor inicial, com frequência decrescente e amplitude crescente, até atingir um máximo, e depois decai rapidamente. Comparando-o com o campo gaussiano, este possui um lobo central estreito, mas lobos laterais relativamente intensos, Durning et alii (1987), citados por BUTTON (1998). Por fim, as ondas X são assim chamadas devido a aparência do campo acústico mapeado num plano perpendicular ao

eixo. Estas propagam-se após a fonte de abertura infinita, sem modificar sua forma no espaço e no tempo; são não-difrativas e mantêm a amplitude constante ao longo do eixo acústico. Segundo Lu e Greenleaf (1991), citados por BUTTON (1998), o campo de ondas X apresenta grande profundidade de campo, largura de campo lateral estreita no componente central, mas também, ramos laterais que podem ser considerados como lobos laterais.

A apodização na polarização é feita através da orientação não-linear dos domínios elétricos na cerâmica piezoelétrica. Esta orientação pode ser feita tanto intensificando o alinhamento dos domínios da região central da cerâmica, como também, apenas os domínios da região de borda da cerâmica. Os experimentos realizados por BRITTAN e WEIGHT (1987) obtiveram através do processo de apodização na polarização, campos acústicos compostos apenas por ondas planas (PWO) ou campos acústicos compostos apenas por ondas de borda (EWO), BRITTAN e WEIGHT (1987), BUTTON (1998).

Experimentos realizados por HSU et alii (19XX), citados por BUTTON (1998), utilizavam um bloco de cerâmica piezoelétrica, que possuía na parte superior uma escavação metalizada em formato esférico para o encaixe do eletrodo esférico de apodização; após a apodização a cerâmica era cortada para retirada da parte esférica, restando apenas a parte inferior em formato de disco plano. Isto era feito pois acreditava-se que quase todo o campo elétrico de polarização seria dissipado no óleo isolante circundante, se o eletrodo esférico não estivesse totalmente em contato com a face da cerâmica. Os trabalhos realizados por BUTTON (1998) mostraram que o mesmo não ocorria, pois as linhas de campo, não sofrem interferência do óleo isolante, necessitando-se apenas posicionar o eletrodo esférico acima do disco de cerâmica para formatar a orientação dos domínios elétricos.

Os experimentos realizados por BUTTON (1998) mostraram o efeito principal da apodização na propagação do campo acústico, para o qual se obteve um aumento da profundidade de campo (linha de intensidade de campo de -3dB). Nestes experimentos foi utilizado um eletrodo esférico de polarização, que era colocado sobre uma das faces da cerâmica (sem eletrodo depositado), para formatação do campo de polarização. A cerâmica

foi aquecida em um recipiente com óleo isolante até 160°C, e um campo elétrico DC de 2 kV/mm de espessura de cerâmica foi aplicado e mantido até o óleo isolante resfriar à temperatura ambiente, o que demorava aproximadamente quatro horas e trinta minutos. Os acoplamentos eletromecânicos efetivos ( $k_{ef}$ ) obtidos foram superiores a 0,4, BUTTON, COSTA e MAIA (2000), BUTTON et al ( 2000).

Os discos cerâmicos são fornecidos pelos fabricantes, polarizados para vibrar preferencialmente no modo espessura, ou seja, na direção do eixo de propagação do campo acústico. A apodização, como utilizada em BUTTON (1998), consistiu na polarização não linear da cerâmica piezoelétrica com o objetivo de reduzir a difração acústica gerada por transdutores de ultra-som. Na apodização a região central do disco cerâmico é polarizada com mais intensidade e os domínios ferroelétricos desta região ficam mais fortemente alinhados com o campo aplicado, do que os domínios ferroelétricos próximos à borda da cerâmica, como mostra a Figura II.14. Isto minimiza a difração acústica, BUTTON, COSTA e MAIA (2000), BUTTON et al ( 2000). A difração é causada pela interferência entre as ondas planas e as ondas de borda, STEPANISHEN (1971), WEIGHT e HAYMAN (1978), WEIGTH e RESTORI (1986). O fato das bordas de um disco de cerâmica piezoelétrica estarem presas, no corpo do transdutor, faz com que os dipolos elétricos desta região, vibrem diferentemente dos dipolos localizados na região central do disco. As ondas acústicas geradas nas bordas não estão em fase com a frente de onda gerada pela região central do disco (ondas planas), conforme pode ser observado na representação da propagação do campo acústico na Figura II.15. Nota-se, uma onda principal, gerada por dipolos da região central, a frente de duas outras ondas geradas por dipolos localizados na região de borda da cerâmica Assim, reduzindo a intensidade das ondas de borda, estamos reduzindo a difração no campo acústico dos transdutores de ultra-som.

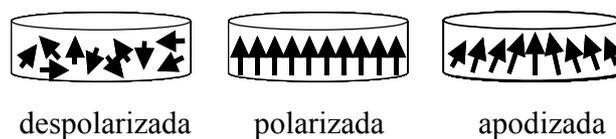


Figura II.14 Orientação dos dipolos elétricos em um disco de cerâmica piezoelétrica, despolarizado, polarizado uniformemente e apodizado, respectivamente

Assim, reduzindo a intensidade das ondas de borda, estamos reduzindo a difração no campo acústico dos transdutores de ultra-som.

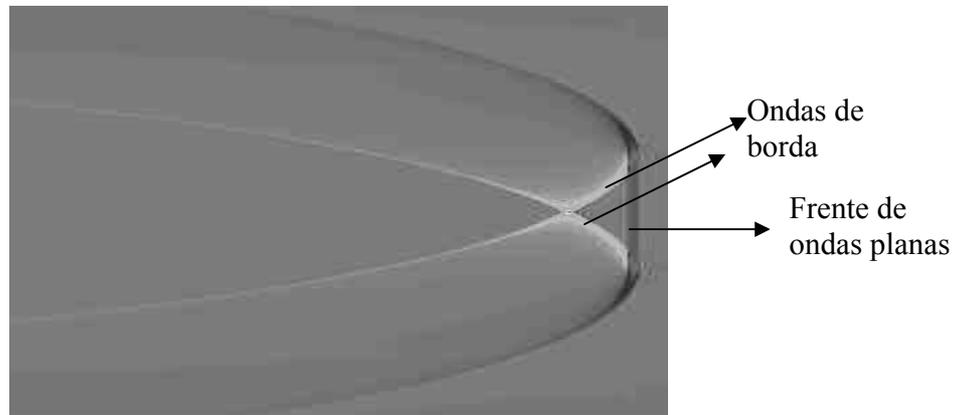


Figura II.15. Simulação da propagação de uma frente de ondas planas (originada na região central de um disco de cerâmica piezoelétrica vibrando) sofrendo a interferência das ondas de borda (originadas na região de borda do disco) (modificado de Nicacio, 2000).

### III. MATERIAIS E MÉTODOS

As variações de temperatura e duração da aplicação do campo de polarização, efetuadas no processo de apodização de cerâmicas piezoelétricas, tiveram como objetivo principal, buscar a melhor relação entre a duração do tempo de aplicação do campo elétrico e a temperatura de aquecimento do banho de óleo isolante em que a cerâmica é submersa durante tal processo. Investigou-se também, qual era o melhor instante, durante o processo de apodização, para aplicação do campo elétrico DC de alta intensidade.

Inicialmente foram utilizadas cerâmicas de Titanato Zirconato de Chumbo, do tipo PZT-5A, polarizadas de fábrica da EDO Acoustics, com 0,885mm de espessura e 12,7mm de diâmetro, e posteriormente da APCI, com 1mm de espessura e 12,7mm de diâmetro. Com o auxílio de um Analisador de Impedâncias foram traçadas curvas, do Módulo e da fase da impedância *versus* frequência, para identificar as respectivas frequências de ressonância e anti-ressonância e os coeficientes de acoplamento piezoelétrico dos modos radial e espessura de vibração de cada disco cerâmico.

A seguir as cerâmicas foram despolarizadas num forno de temperatura controlada: os discos foram aquecidos até a temperatura de Curie, 350°C, e esta temperatura foi mantida constante por pelo menos 1 hora. O Analisador de Impedâncias foi usado para confirmação da despolarização das cerâmicas.

O eletrodo da face positiva de cada um dos discos cerâmicos foi retirado, e as cerâmicas, então, foram apodizadas. O eletrodo de apodização utilizado foi um eletrodo esférico, de 5mm de raio, de aço-carbono. Esta medida de eletrodo esférico foi escolhida, baseando-se na simulação, feita através do Método de Elementos Finitos, da análise eletrostática, realizada por BUTTON (1998), para cerâmicas PZT5-A com 1mm de espessura e 12,7mm de diâmetro. Na simulação, o eletrodo com 5mm de raio, foi o que obteve a melhor distribuição da intensidade do campo elétrico ao longo do raio da cerâmica.

No presente trabalho as apodizações foram realizadas variando-se a temperatura do óleo isolante e/ou o tempo de aplicação do campo elétrico na cerâmica. As variações de temperatura ocorreram na faixa de 120°C a 250°C e as variações do tempo, entre 2 minutos e o período necessário para resfriar o óleo novamente à temperatura ambiente, o que levava em média 4 horas e 30 minutos.

Foi utilizada uma fonte de alta tensão DC, ajustável até 5kV, para aplicar 2kV/mm de espessura do disco, entre o eletrodo esférico, colocado no centro da face superior da cerâmica e o eletrodo depositado na outra face (terra) do disco. A cerâmica permanecia imersa em um recipiente com óleo isolante, que era aquecido até a temperatura desejada. Aplicava-se o campo elétrico de apodização desde o início do aquecimento do óleo isolante ou apenas quando o óleo atingisse a temperatura desejada. Este campo poderia ser aplicado enquanto a cerâmica resfriava até a temperatura ambiente ou apenas durante um período determinado de tempo.

Após o processo de apodização, os eletrodos retirados das cerâmicas foram reconstituídos com deposição de prata, pelo processo de *sputtering*, e em seguida as cerâmicas foram submetidas novamente ao Analisador de Impedâncias, para determinação das alterações nas frequências de ressonância e anti-ressonância e no coeficiente de acoplamento eletromecânico “k”.

Com as cerâmicas apodizadas que apresentaram um acoplamento eletromecânico considerado satisfatório ( $k > 0,4$ ), foram montados transdutores de ultra-som, que em seguida foram caracterizados através da obtenção dos pulsos acústicos gerados (medidos por hidrofone pontual), da largura de banda (obtida com o espectro de frequências dos ecos gerados por alvos planos), e pelo mapeamento de seus campos acústicos, a fim de comparar seus desempenhos e verificar se ocorreu ou não redução da difração acústica nos mesmos, confirmando com isto, a eficiência do processo de apodização utilizado.

A metodologia deste trabalho foi baseada nos procedimentos propostos por BUTTON (1998), cujos experimentos comprovaram a eficiência do processo de apodização na

redução da difração acústica no campo gerado por transdutores de ultra-som. O método utilizado aqui, para apodização, foi praticamente o mesmo, mas buscando-se uma redução do tempo de aplicação do campo elétrico.

A título de comparação, também foram construídos transdutores com cerâmicas polarizadas uniformemente.

### **III. 1 ETAPAS DO PROCESSO DE APODIZAÇÃO**

#### **III. 1. 1 Documentação da cerâmica polarizada de fábrica**

A documentação da cerâmica foi realizada em um Analisador de Impedâncias (HP-4192A), utilizando dois programas desenvolvidos pelo Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia (CEFET-PR), enquanto doutorando, no Laboratório de Ultra-Som (LUS), um escrito em linguagem C, “AL”, que permite capturar os dados do Analisador, e outro programa, chamado “Impedância”, que permite traçar as curvas de Módulo e Fase de Impedância x Freqüência, desenvolvido em ambiente Matlab. A faixa de freqüência analisada foi entre 25kHz e 3000kHz, que contém todos os modos de vibração dos transdutores utilizados. Os modos mais fortemente acoplados são os modos radial ou planar e espessura. As freqüências de ressonância e anti-ressonância de cada modo foram utilizadas para calcular o fator de acoplamento eletromecânico efetivo daquele modo, a partir da Equação (II.40) apresentada no Capítulo II.

#### **III. 1. 2 Despolarização da cerâmica**

A despolarização da cerâmica foi feita colocando-se a mesma em um forno especial, onde a cerâmica permaneceu aquecida a 350°C durante 1 hora com o objetivo de desorientar os dipolos elétricos da mesma e obter com isto a sua despolarização. Foram traçadas novas curvas de Módulo de Impedância x Freqüência e Fase da Impedância x Freqüência para todas as cerâmicas para ter certeza que estas haviam sido totalmente despolarizadas.

### III. 1. 3 Retirada do eletrodo do lado positivo da cerâmica

O eletrodo metálico, depositado na face definida como positiva da cerâmica, foi retirado manualmente, utilizando-se uma lixa fina e acetona para facilitar sua remoção. O uso de uma politriz foi evitado, pois poderia retirar parte do elemento cerâmico junto com o eletrodo de prata.

### III. 1. 4 Apodização

O processo de apodização é similar ao da polarização uniforme da cerâmica, pois o objetivo também é direcionar os dipolos elétricos da cerâmica piezoelétrica, conforme está representado na Figura III.1:

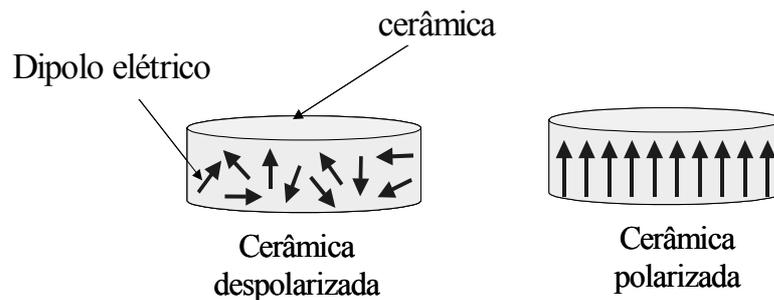


Figura III.1 Representação esquemática da orientação dos dipolos elétricos em uma cerâmica despolarizada e em uma cerâmica polarizada uniformemente.

A Figura III.1 mostra a desorientação dos dipolos elétricos em uma cerâmica despolarizada e a orientação destes dipolos, após a cerâmica ser polarizada uniformemente.

O processo de apodização utilizado neste trabalho aplica o campo de polarização através de um eletrodo esférico de aço-carbono de diâmetro (10mm) menor que o da cerâmica (12,7mm). Isto faz com que os dipolos elétricos da cerâmica se alinhem ao longo do raio do disco de cerâmica não-uniformemente, de acordo com o formato do campo elétrico aplicado, que é mais intenso no centro do disco, e que vai diminuindo de intensidade em direção à borda do mesmo, o que reduz a polarização dos dipolos na borda da cerâmica, como mostra a Figura III.2.

O processo de apodização é mais demorado que a polarização uniforme, quando ambos os processos são realizados à mesma temperatura inicial (do óleo isolante), pois a intensidade do campo elétrico aplicado, responsável pelo alinhamento dos dipolos ferroelétricos é menor, fora do centro do disco, em comparação à polarização uniforme.

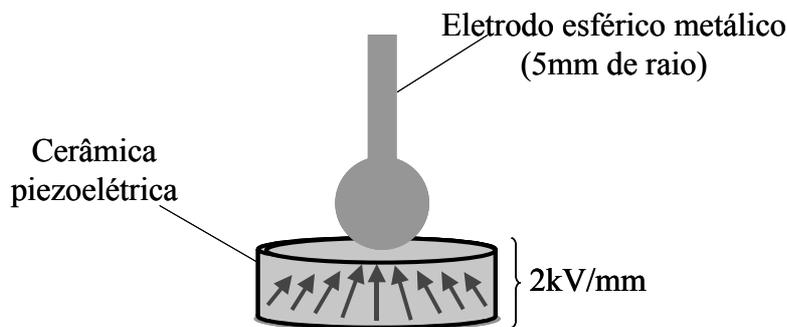


Figura III.2 Representação da orientação dos dipolos elétricos em uma cerâmica apodizada; o campo elétrico de polarização é formatado por um eletrodo esférico metálico de diâmetro menor que o diâmetro da cerâmica.

A cerâmica é imersa em um recipiente com óleo mineral isolante. Foram utilizados dois tipos de óleo mineral: o óleo mineral que já era utilizado no LUS (Nujol) e um óleo mineral para altas temperaturas (R-Temp, Cooper Power). O recipiente ou cuba de polarização, mostrado na Figura III.3, possui um aquecedor resistivo (em forma de serpentina) que tem o objetivo de aquecer o óleo isolante até a temperatura desejada. A temperatura do óleo é monitorada por um termômetro digital (InstruTherm). Uma fonte de alta tensão DC (0-5kV, 100mA) da Tectrol, foi utilizada para aplicar o campo elétrico de 2kV/mm de espessura da cerâmica, BRITTAN e WEIGHT (1987). Na cerâmica com 0,885 mm de espessura, foi aplicado um campo elétrico de 1,77kV entre as faces da cerâmica. Um osciloscópio (Tektronics-2430A), conectado através de um isolador de alta tensão (Tektronics-A6902B), foi utilizado para acompanhamento do nível de tensão elétrica no processo de apodização.

### III. 2 VARIAÇÕES NO PROCESSO DE APODIZAÇÃO

As variações no processo de apodização foram feitas para determinar a melhor relação entre a temperatura de aquecimento do óleo isolante, que é responsável pelo relaxamento dos dipolos elétricos da cerâmica piezoelétrica, o que facilita o realinhamento destes

dipolos com o campo elétrico externo de apodização, e o tempo de aplicação deste campo elétrico. Resultados eficientes na apodização de cerâmicas piezoelétricas já haviam sido obtidos no LUS, BUTTON (1998), com temperatura inicial do óleo igual a 160°C e com o campo de 2kV/mm aplicado desde esta temperatura, até a cerâmica resfriar a temperatura ambiente (o que levava cerca de 4 horas e 30 minutos). Este procedimento foi repetido, e outros procedimentos de apodização foram realizados, buscando reduzir, principalmente, o tempo de aplicação do campo elétrico, mas mantendo os efeitos de redução da difração acústica, esperados.

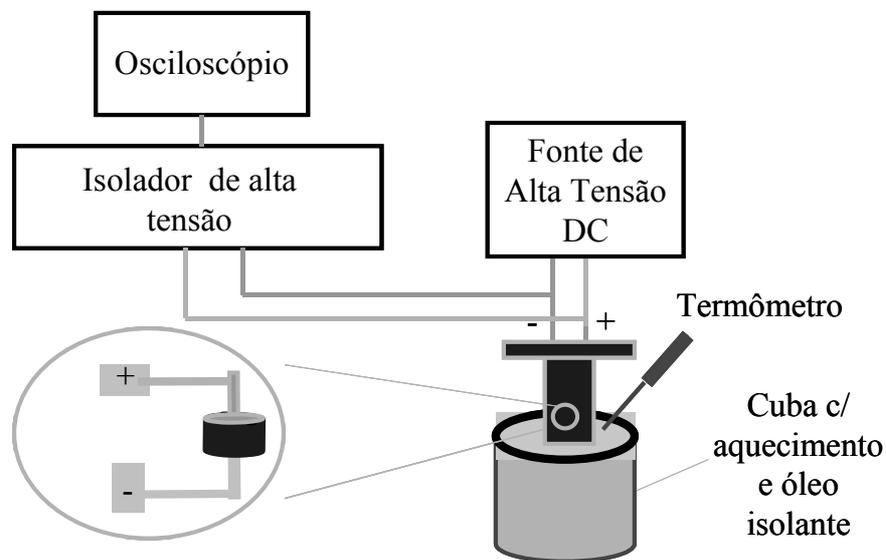


Figura III.3 Diagrama esquemático dos componentes utilizados no processo de polarização de um disco de cerâmica piezoelétrica; no destaque detalha-se o posicionamento da cerâmica dentro do suporte no decorrer do processo.

Ao todo foram realizadas mais de 80 apodizações, sendo que entre estas estão incluídas apodizações que não obtiveram resultados satisfatórios por falha no processo de apodização, ou por problemas com a própria cerâmica. Uma das falhas no processo constatadas foi que o eletrodo esférico de apodização, após algum tempo de uso (aproximadamente 6 meses), imerso no óleo isolante Nujol, apresentava uma camada isolante na sua superfície, camada esta que modificava a distribuição das linhas de campo elétrico através da cerâmica. Este problema foi constatado após algumas apodizações, pois como estávamos variando os processos de apodização, acreditávamos que o baixo acoplamento eletro-mecânico resultante era decorrente do processo de apodização utilizado. Depois de constatado o problema, o eletrodo esférico foi trocado por outro de mesmo

material e diâmetro e buscou-se mantê-lo fora do óleo e limpo entre as apodizações, e portanto, livre de deposições.

Nas apodizações realizadas, a cerâmica foi retirada do óleo logo após o período de exposição ao campo elétrico de apodização.

### **III. 2. 1 Variação de temperatura do banho de óleo isolante**

O banho de óleo isolante (Nujol) e a cerâmica eram aquecidos até uma determinada temperatura; o aquecedor era desligado; o campo elétrico de apodização era aplicado até o banho de óleo resfriar e atingir novamente a temperatura ambiente ( $TA = 25^{\circ}C$ ):

- Aplicação do campo elétrico DC a  $120^{\circ}C$  até TA (temperatura ambiente)
- Aplicação do campo elétrico DC a  $140^{\circ}C$  até TA (temperatura ambiente)
- Aplicação do campo elétrico DC a  $160^{\circ}C$  até TA (temperatura ambiente)
- Aplicação do campo elétrico DC a  $200^{\circ}C$  até TA (temperatura ambiente)

### **III. 2. 2 Variação de tempo de aplicação de campo elétrico**

Para as temperaturas  $160^{\circ}C$  e  $200^{\circ}C$ , o campo elétrico foi aplicado por períodos que variaram de 4 minutos a 4 horas e meia:

- Aplicação do campo elétrico DC a  $160^{\circ}C$  até TA (temperatura ambiente)
- Aplicação do campo elétrico DC a  $160^{\circ}C$  durante 120 minutos
- Aplicação do campo elétrico DC a  $160^{\circ}C$  durante 60 minutos
- Aplicação do campo elétrico DC a  $160^{\circ}C$  durante 20 minutos
- Aplicação do campo elétrico DC a  $160^{\circ}C$  durante 04 minutos
- Aplicação do campo elétrico DC a  $200^{\circ}C$  até TA (temperatura ambiente)
- Aplicação do campo elétrico DC a  $200^{\circ}C$  durante 60 minutos
- Aplicação do campo elétrico DC a  $200^{\circ}C$  durante 20 minutos

### **III. 2. 3 Aplicação do campo elétrico DC desde a temperatura ambiente**

Também foram feitas apodizações em que o campo elétrico foi aplicado à cerâmica desde o início do aquecimento do banho de óleo isolante e mais um período determinado, 20, 60 ou 120 minutos, ou ainda, até o óleo resfriar até a temperatura ambiente. Foram realizados ensaios com três temperaturas: 160°C, 200°C e 220°C.

- Aplicação do campo elétrico DC desde TA a 160°C, até TA novamente.
- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 160°C, durante 120 minutos após atingir 160°C.
- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 160°C, durante 60 minutos após atingir 160°C.
- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 160°C, durante 20 minutos após atingir 160°C.
- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 200°C, até TA novamente.
- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 200°C, durante 60 minutos após atingir 200°C.
- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 200°C, durante 20 minutos após atingir 200°C.

### **III. 2. 4 Manutenção da temperatura constante durante a aplicação do campo elétrico de apodização**

Algumas apodizações foram realizadas aplicando-se o campo elétrico à cerâmica desde o início do aquecimento do óleo até atingir a temperatura desejada, e durante mais um período em que a temperatura foi mantida constante.

- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 160°C, durante 20 minutos após atingir 160°C com subsequente retirada da cerâmica.
- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 200°C, durante 20 minutos após atingir 200°C com subsequente retirada da cerâmica.

- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 200°C, durante 10 minutos após atingir 200°C com subsequente retirada da cerâmica.
- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 200°C, durante 05 minutos após atingir 200°C com subsequente retirada da cerâmica.

### **III. 2. 5 Aplicação do campo elétrico DC em altas temperaturas**

O óleo Nujol não é adequado para se trabalhar a temperaturas maiores que 160°C, pois evapora e queima. Já o óleo mineral R-Temp da CooperPower permitiu que se alcançassem temperaturas de 220°C e 250°C, com pouca evaporação.

- Aplicação do campo elétrico DC desde TA a 220°C, durante 20 minutos após atingir 220°C com subsequente retirada da cerâmica.
- Aplicação do campo elétrico DC desde TA até 220°C, durante 05 minutos após atingir 220°C com subsequente retirada da cerâmica.
- Aplicação do campo elétrico DC desde 200°C até 250°C, durante 05 minutos após atingir 250°C com subsequente retirada da cerâmica.
- Aplicação do campo elétrico DC a 250°C, durante 05 minutos após atingir 250°C com subsequente retirada da cerâmica.

### **III. 2. 6 Apodizações utilizando cerâmicas APCI (1mm de espessura)**

As variações no processo de apodização apresentadas até o item III.2.5 foram realizadas utilizando cerâmicas da Edo Acoustics de 0,885mm de espessura e 12,7mm de diâmetro. Com as cerâmicas da APCI com 1mm de espessura e 12,7mm de diâmetro foram realizadas as seguintes variações:

- Aplicação do campo elétrico DC a 250°C, durante 05 minutos após atingir 250°C com subsequente retirada da cerâmica.
- Aplicação do campo elétrico DC a 250°C, durante 02 minutos após atingir 250°C com subsequente retirada da cerâmica.

- Aplicação do campo elétrico DC a 250°C, durante 05 minutos após atingir 250°C com subsequente retirada da cerâmica, com eletrodo esférico de 3mm de raio.
- Aplicação do campo elétrico DC desde TA (temperatura ambiente) até 200°C, durante 20 minutos após atingir 200°C com subsequente retirada da cerâmica.
- Aplicação do campo elétrico DC a 160°C até TA (temperatura ambiente)

### **III. 3 DEPOSIÇÃO DO ELETRODO DE PRATA (*sputtering*)**

O método adotado para reconstituição do eletrodo removido de uma das faces da cerâmica, foi o *sputtering*, no qual um alvo de prata, colocado no anodo do equipamento, é bombardeado com gás argônio, que faz com que esta prata se solte do alvo e seja depositada no elemento cerâmico que se encontra no catodo, na parte inferior do equipamento. Este processo é realizado no vácuo. O bombardeio de argônio, feito durante 500 segundos, produz um eletrodo de espessura adequada. O equipamento utilizado foi o Sputter SCD-050 (BAL-TEK) do Laboratório de Metalografia do Departamento de Materiais (DEMA) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da UNICAMP.

### **III. 4 DOCUMENTAÇÃO DA CERÂMICA APODIZADA**

A documentação da cerâmica foi realizada novamente com o Analisador de Impedâncias (modelo HP 4192A), para obtenção das novas curvas do Módulo de Impedância x Freqüência e Fase da Impedância x Freqüência para identificação de alterações nas freqüências dos modos de vibração e do novo coeficiente de acoplamento eletromecânico.

### **III. 5 VERIFICAÇÃO DO EFEITO DE POLARIZAÇÕES CONSECUTIVAS**

Algumas cerâmicas foram apodizadas e despolarizadas várias vezes, principalmente se o procedimento de apodização usado resultava num coeficiente de acoplamento eletromecânico baixo para o modo espessura de vibração. Para verificar se o fato da cerâmica ser despolarizada e repolarizada várias vezes proporcionava alguma alteração nas

suas propriedades piezoelétricas e, poderia ter alguma influência nas medidas e comparações realizadas, uma cerâmica foi despolarizada e polarizada uniformemente a 160°C (campo aplicado desde TA até TA), por duas vezes e posteriormente a 200°C (campo aplicado desde TA até 20 minutos após atingir 200°C) por mais duas vezes. Após cada polarização, as curvas da impedância (módulo e fase) em função da frequência foram obtidas e não apresentaram, à princípio, nenhuma modificação significativa nas frequências de ressonância e de anti-ressonância e, portanto, nenhuma modificação significativa dos coeficientes de acoplamento eletromecânico. Estes resultados serão enfocados posteriormente no capítulo V.

### **III. 6 ETAPAS DA MONTAGEM DOS TRANSDUTORES**

Com as cerâmicas que apresentaram coeficientes de acoplamento eletromecânico satisfatório foram construídos transdutores de elemento único para que fosse feito o mapeamento do campo acústico gerado e através deste, obter as alterações no feixe acústico de um transdutor apodizado, onde se espera uma menor difração acústica e com isso, uma maior profundidade de campo. Transdutores com elemento cerâmico polarizado e com elemento cerâmico apodizado foram construídos para comparação.

#### **III. 6. 1 Procedimentos para construção do transdutor**

- (a) Soldagem de fio no eletrodo da face negativa da cerâmica - Dois fios finos (um deles por precaução), foram soldados no eletrodo depositado na face negativa da cerâmica, usando ferro de soldar com temperatura controlada (200°C).
- (b) Camada de retaguarda (*backing*) – Um tubo de PVC com 35mm de comprimento e diâmetro interno igual ao diâmetro da cerâmica, foi colocado ao redor da cerâmica, sendo que a face negativa da cerâmica ficasse exposta em uma das extremidades do tubo. Aproximadamente 2/3 do volume do tubo foi preenchido com uma mistura de epóxi + 25% de pó de tungstênio do peso total de epóxi. O conjunto foi colocado numa centrífuga por oito minutos girando a 1000 “rpm” para compactar a mistura dentro do

tubo e eliminar bolhas, e depois foi colocado em uma estufa a 40° Celsius durante trinta minutos, para secar. Os resultados mostraram que 8 minutos de centrifugação era um tempo muito prolongado: o tungstênio tem impedância acústica e densidade elevadas, o que ocasionou a separação da cola epóxi do pó de tungstênio, concentrando-o na região próxima à cerâmica. Posteriormente a mistura utilizada na camada de retaguarda foi substituída por epóxi + 35% de pó de alumina e os transdutores anteriormente construídos foram descartados. O conjunto foi colocado em uma centrífuga por dois minutos (1000 rpm) e depois em uma estufa a 40° Celsius durante trinta minutos, para secar a mistura.

- (c) Tubo de latão – Um tubo de latão, colado ao redor do tubo de PVC foi usado para dar suporte ao transdutor e estabelecer contato elétrico com a face frontal da cerâmica. O comprimento deste tubo (40mm) é superior ao do tubo de PVC para que haja espaço para soldar um fio no tubo de latão. Para estabelecer contato elétrico entre a face anterior da cerâmica (face positiva) e o tubo de latão, uma camada de prata foi depositada por *sputtering*. A prata depositada cobriu a cerâmica, e as bordas dos tubos de PVC e de latão. Para garantir um bom contato, foi colocada, também, uma camada de cola condutiva sobre as bordas dos tubos de PVC. Foi feito um pequeno furo no outro lado do tubo de latão para facilitar a soldagem de um fio, que constituiu o contato elétrico com a face externa da cerâmica piezoelétrica. Este fio foi soldado à malha do cabo coaxial (terra).
- (d) Nova documentação da cerâmica – Esta nova documentação teve por finalidade, a identificação de qualquer alteração na frequência de ressonância do modo espessura. O valor da frequência de ressonância medida foi utilizado para calcular a espessura da camada de compatibilização (*matching*) do transdutor ( $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda da frequência de ressonância do modo espessura).
- (e) Revestimento externo – Um tubo de PVC, usado como revestimento externo do transdutor, foi colado ao tubo de latão, de modo que sua borda ficasse avançada em relação à borda do tubo de latão, de uma medida igual a  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda

( $\lambda/4$ ) da frequência de ressonância do modo espessura do transdutor. A regulagem desta medida foi feita com o auxílio de um micrômetro digital e de um suporte (Figura III.4), também desenvolvido nesta tese, para apoiar o tubo de PVC do transdutor no momento da regulagem da camada de compatibilização: o do tubo de latão era “empurrado”, para dentro do tubo de PVC, de uma medida equivalente a um quarto do comprimento da onda acústica, “ $\lambda/4$ ”, da frequência de ressonância do modo espessura do transdutor. O tubo de PVC era mantido na posição horizontal até a cola secar.

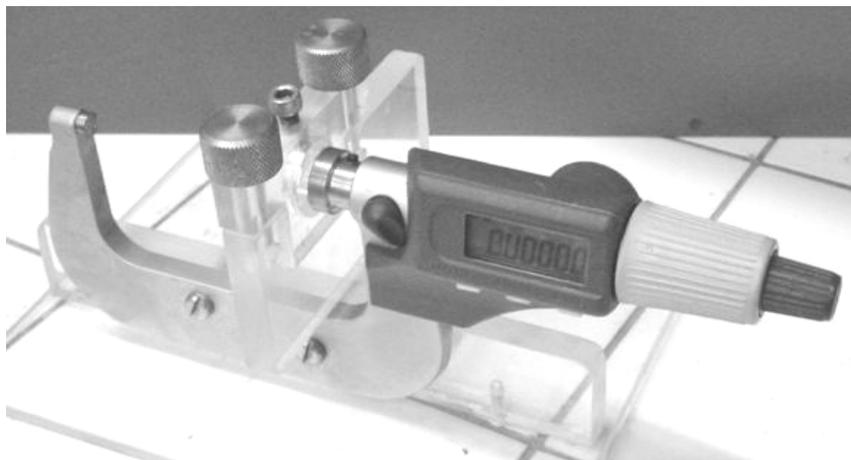
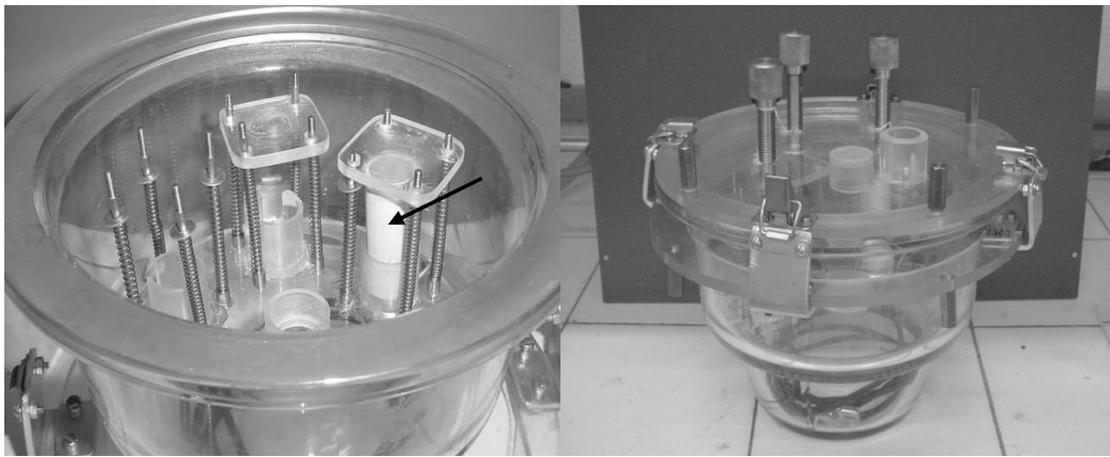


Figura III.4. Suporte com micrômetro digital usado para ajustar a distância de  $\lambda/4$  entre a borda do transdutor (tubo externo de PVC) e a face frontal da cerâmica piezoelétrica.

- (f) Deposição de prata – Uma nova deposição de prata foi feita nesta fase da construção, porque nas etapas anteriores, com frequência, ocorreu o desgaste da prata depositada, pelo próprio manuseio do transdutor.
- (g) Camada de compatibilização acústica (*matching*) – Esta camada é composta de epóxi de baixa densidade com endurecedor, sendo que a mistura final não deve possuir bolhas de ar, para não causar atenuação na propagação do feixe acústico. Para isto, foi desenvolvido, no LUS (Maurício Duarte), um sistema (Figura III.5) onde o transdutor, com a parte frontal coberta pelo epóxi era colocado em um recipiente e sobre o mesmo era colocado um suporte em acrílico, revestido por acetato, que permanecia separado do transdutor pela pressão das molas que sustentavam este suporte (Figura III.5 (a)). O

recipiente era fechado (Figura III.5 (b)) e então era produzido vácuo (60cm Hg), através de uma mangueira que era conectada, em uma extremidade, na parte superior do recipiente e na outra extremidade, em uma bomba a vácuo. Após a extinção das bolhas de ar na camada de compatibilização, o suporte revestido de acrílico era pressionado contra a camada de compatibilização através da haste de ferro que possuía rosca e era rosqueada pela parte externa do sistema. A parte frontal do transdutor era mantida pressionada por até 40 horas, até a secagem da cola epóxi sem formação de bolhas de ar.



(a) (b)  
Figura III.5. Sistema de vácuo usado para secar a camada de compatibilização acústica sem formação de bolhas de ar; (a) posicionamento do transdutor (indicado pela seta) no suporte e (b) suporte fechado pronto para conectar-se à bomba a vácuo (FANEM –Mod: 089–CAL) e então produzir o vácuo no seu interior.

- (h) Colocação do cabo coaxial – O cabo coaxial é ligado na parte posterior do transdutor, sendo que o fio que está em contato com a carcaça (face positiva da cerâmica) foi soldado na malha do cabo (“terra”) e o fio em contato com a face negativa da cerâmica foi soldado no fio central do cabo (“vivo”).
- (i) Vedação com epóxi – Um pouco de epóxi foi colocado na parte posterior do transdutor entre o tubo PVC externo e o cabo coaxial, para garantir a vedação do transdutor e permitir que ele seja utilizado na água.

- (j) Colocação do conector BNC – A colocação do conector BNC no cabo coaxial é praticamente a última etapa de construção de um transdutor.

As Figuras III.6 a III.10 ilustram as etapas de construção de transdutores.

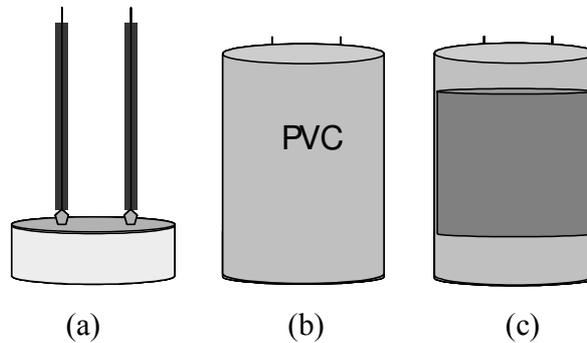


Figura III.6 Etapas da construção de transdutores: (a) soldagem de fios no eletrodo da cerâmica; (b) colocação do tubo de PVC que dá forma à camada de retaguarda; e (c) colocação da mistura de epóxi e pó de alumina ou tungstênio que constitui a camada de retaguarda.

Após cada etapa de construção, o Analisador de Impedâncias foi usado para obter as curvas de Módulo e Fase de Impedância x Frequência para constatar se a cerâmica não havia sofrido dano ou despolarização ou se o transdutor não havia perdido contato elétrico durante o processo de construção, e também, após a etapa final, para verificar possíveis alterações nas frequências e coeficientes de acoplamento eletromecânico dos modos de vibração em relação aos modos da cerâmica vibrando livre.

No Analisador de Impedâncias também foram medidos os valores de capacitância intrínseca dos transdutores, na frequência de ressonância do modo espessura, para determinação do valor do indutor “ $L_0$ ” para realizar o acoplamento elétrico dos transdutores construídos.

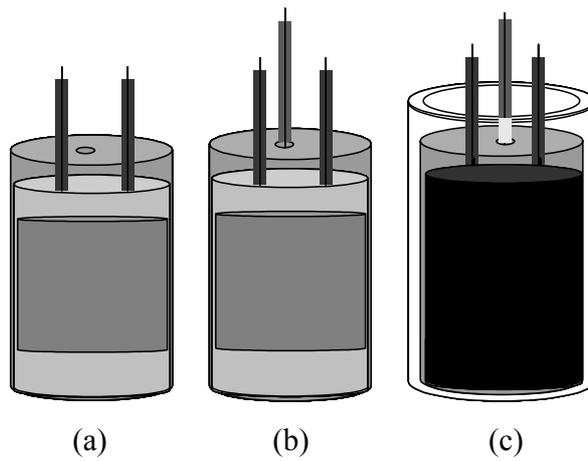


Figura III.7. Etapas da construção de transdutores: (a) colocação do tubo de latão sobre o tubo de PVC; (b) solda de fio no tubo de latão; e (c) colocação do revestimento externo.

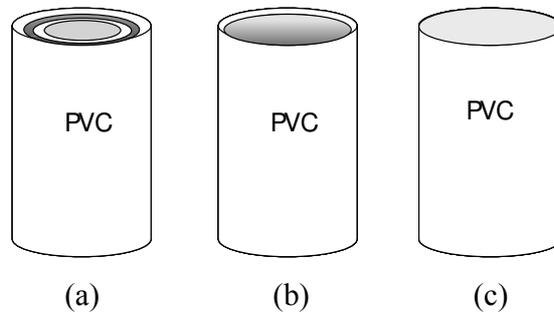


Figura III.8 Etapas da construção de transdutores. (a) colocação do revestimento externo, (b) após deposição de prata e (c) após deposição da camada de compatibilização.

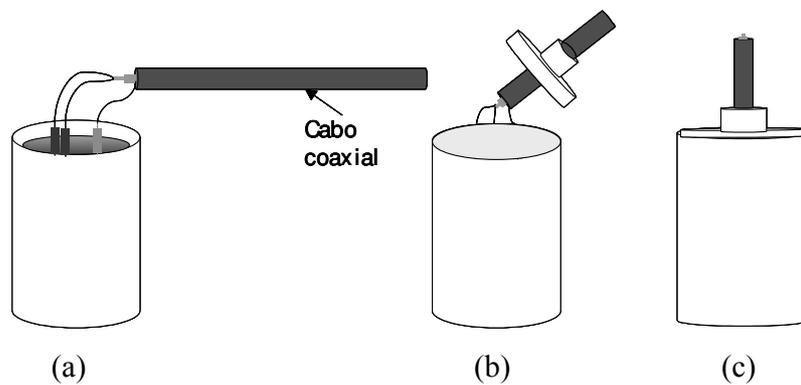


Figura III.9 Etapas da construção de transdutores: (a) colocação do cabo coaxial; (b) após colocação de epóxi e (c) após vedação final.

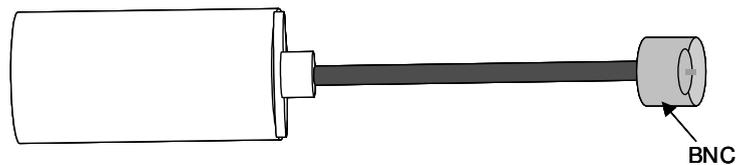


Figura III.10 Etapa final da construção de transdutores, encaixe do pino BNC.

- (k) Compatibilização elétrica (*electrical matching*) – A compatibilização elétrica é necessária para compatibilizar as impedâncias do transdutor e do equipamento utilizado para gerar os pulsos de excitação do elemento piezoelétrico. A partir dos valores de  $f_r$  (frequência de ressonância) e dos valores medidos de  $C_0$  (capacitância) no Analisador de Impedâncias, os valores de  $L_0$  (indutância) foram calculados a partir da Equação III.1, e resultaram valores muito baixos, por exemplo, da ordem de nH. Inicialmente a compatibilização elétrica não foi realizada nos transdutores construídos, em função dos valores de indutância “erroneamente” encontrados, conforme será explicado no capítulo IV e, posteriormente, baseado nos transdutores construídos por BUTTON (1998), os quais apresentavam medidas similares, os valores adequados foram obtidos a partir de associações de indutores maiores.

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

### III. 7 ETAPAS DA CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSDUTORES

As medidas realizadas para obter os pulsos ultra-sônicos gerados pelo transdutor e seus ecos e mapear os campos acústicos gerados pelos transdutores construídos foram realizadas 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 está localizado no Centro de Engenharia Biomédica (CEB/UNICAMP). O LUS possui um Sistema de Mapeamento de Campo Acústico, composto de um tanque de acrílico com capacidade para 500 litros de água, um sistema de coordenadas XYZ movimentado por motores de passo, que são controlados por microcomputador através de programas

desenvolvidos em linguagem C, um gerador de funções (Tektronix TM515) com dois módulos, um para gerar taxa de repetição (100Hz) dos sinais de excitação dos transdutores e um para gerar estes sinais (por exemplo, *bursts* de 10 pulsos senoidais na frequência de 2MHz), um osciloscópio digital (Tektronix 2430A), um amplificador de potência (Amplifier Research 75250) que amplifica a saída do gerador de funções para dezenas ou centenas de Vpp, e o microcomputador que controla a geração dos estímulos e a aquisição de dados durante a realização dos testes.

Durante a realização dos mapeamentos, o transdutor construído funciona como transmissor de pulsos acústicos, que são recebidos por um hidrofone de PVDF (do termo em inglês “polivinylidene difluoride”), com diâmetro de 1mm e faixa de passagem 1MHz à 20MHz (Precision Acoustics); os sinais recebidos são pré-amplificados, por 2 amplificadores em série, de 10dB cada um, antes de serem capturados pelo osciloscópio digital. As medidas obtidas nos mapeamentos são intensidades relativas e/ou são normalizadas devido ao hidrofone não ser calibrado.

A Figura III.11 mostra o Sistema de Mapeamento de Campo Acústico do LUS. O gerador de sinais gera os *bursts* com 10 pulsos, de amplitude 0,5Vpp, na frequência de ressonância do modo espessura do transdutor, simulando um sinal contínuo. Este sinal é amplificado, pelo amplificador de potência, para pelo menos 53Vpp (podendo atingir valores da ordem de 150Vpp), e é usado para excitar o transdutor construído, que está imerso no tanque de água. A saída do gerador de sinais é sincronizada com um sinal emitido pelo gerador de pulsos da “Panametrics”, que é usado para alimentar um transdutor posicionado numa canaleta com água existente numa das laterais superiores do tanque. Um outro transdutor na mesma canaleta capta este sinal, que é mostrado no canal 1 do osciloscópio. Estes transdutores (FUNBEC, 1.6 MHz / 19mm Long I.F.) deslocam-se dentro da canaleta, na direção Y, junto com o hidrofone pontual usado para mapear o campo gerado pelo transdutor sob teste, e assim ajustar o *trigger* do osciloscópio. No canal 2 do osciloscópio é mostrado o sinal captado pelo hidrofone que já foi amplificado, este sinal é proveniente dos pulsos captados pelo transdutor construído. O osciloscópio é conectado a um microcomputador que possui um programa que captura o sinal da tela

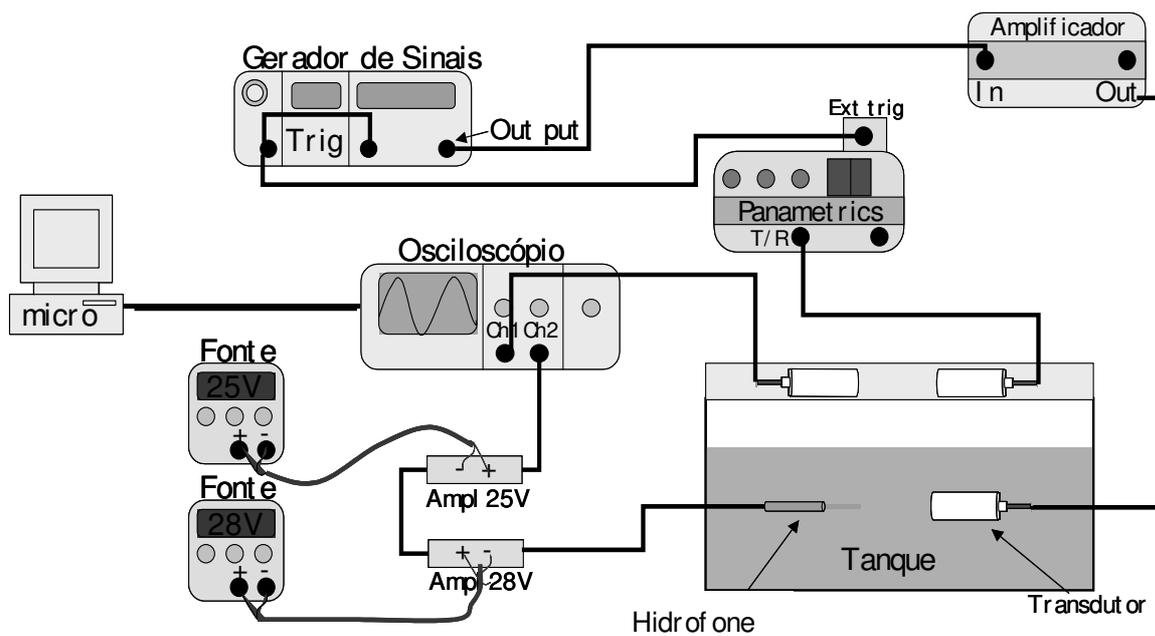
proveniente do canal 2. Como o hidrofone é deslocado em direção ao eixo X e ao eixo Y (eixo de propagação do campo acústico) para mapear a intensidade do sinal do transdutor, através de motores de passo, com passos pré definidos, controlados pelo microcomputador e quando este deslocamento é na direção do eixo Y, a tendência do sinal é de sair da tela do osciloscópio. Isto não acontece porque o sinal captado pelo hidrofone é triggerado com o sinal captado pelo transdutor da canaleta que se desloca no eixo Y, na mesma proporção do hidrofone, então como a referência se desloca acompanhando o sinal, este sinal permanece na tela durante todo o mapeamento.

Um bom alinhamento do transdutor transmissor em relação ao receptor (hidrofone) é essencial para a aquisição de dados coerentes, tanto para visualização do pulso acústico, quanto para o mapeamento do campo acústico. O alinhamento foi feito de forma manual, sendo que o procedimento foi: (1) posicionar o hidrofone próximo ao centro da face do transdutor transmissor; (2) e a partir daí, afastar o hidrofone ao longo do eixo Y, eixo axial no sentido de propagação do feixe acústico nas medidas apresentadas neste trabalho; (c) posicionar o hidrofone em distâncias axiais previamente estabelecidas e deslocá-lo no eixo X, ou eixo lateral, para certificar que a posição de maior intensidade continua sendo uma posição ao longo do eixo axial do transdutor transmissor; (d) se a posição central continuar sendo a de maior intensidade para várias posições ao longo do eixo Y, significa que o transdutor transmissor e o hidrofone estão alinhados. Caso contrário, o transdutor transmissor tem que ser redirecionado e o processo repetido.

Algumas medidas de caracterização do desempenho dos transdutores foram realizadas com o objetivo de confirmar a eficiência dos processos de apodização utilizados e verificar as melhorias obtidas na propagação das ondas ultra-sônicas, que deve apresentar redução da difração acústica, devido à menor produção das ondas de borda, certificando também, se os resultados obtidos foram decorrentes das variações no processo de apodização ou se foram decorrentes de variações que possam ter ocorrido nas etapas de construção dos transdutores.



(a)



(b)

Figura III.11 (a) Foto do sistema de mapeamento do LUS;  
 (b) Diagrama esquemático de interligação dos equipamentos do Sistema de Mapeamento Acústico do LUS.

### III. 7. 1 Mapeamento do campo acústico no plano XY

O mapeamento do campo acústico de cada transdutor construído foi realizado no plano XY com o objetivo de analisar a propagação das ondas nos campos próximo e distante, determinar a largura e a profundidade dos contornos de intensidades -3dB e -6dB (em relação à intensidade máxima do campo) e comparar os resultados obtidos com os de um transdutor não apodizado. No Sistema de Mapeamento Acústico do LUS, o eixo Y coincide com o eixo axial na direção de propagação da onda ultra-sônica, conforme está indicado na Figura III.12. Foram realizados mapeamentos de 40mm x 200mm e de 30mm x 200mm, a partir da face do transdutor, com passos de 1mm em ambas as direções. Os mapeamentos foram representados graficamente, a partir da matriz gerada pelo programa “MAPEAM”, desenvolvido no LUS pelo engenheiro Joaquim Miguel Maia e compiladas no MATLAB, em 3D, 2D, com cores representando as intensidades do campo; em 2D também foram obtidas as curvas de contorno de intensidades de -3dB, -6dB e -20dB em relação à máxima intensidade de campo medido, programas desenvolvidos pelo engenheiro Joaquim Miguel Maia. Também é possível realizar o mapeamento no plano XZ, paralelo à face do transdutor, em distâncias variadas ao longo do eixo Y.

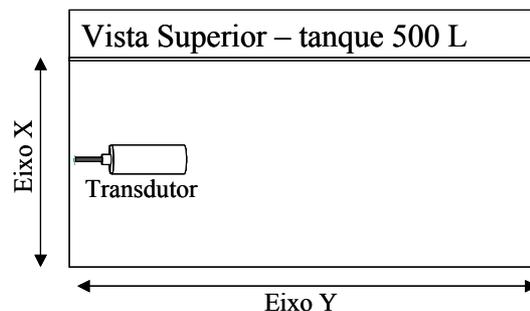


Figura III.12 Sistema de coordenadas adotado no tanque de medidas do Sistema de Mapeamento Acústico do LUS.

Outra opção de mapeamento é realizá-lo apenas ao longo dos eixos, X, Y e Z. Foram realizados mapeamentos da linha Y, ao longo de 200mm do eixo axial do transdutor, com passo de 1mm. A partir deste mapeamento, verifica-se a que distâncias da face ocorrem as reduções de intensidade de -3dB e de -6dB, Figura III.14 (a).

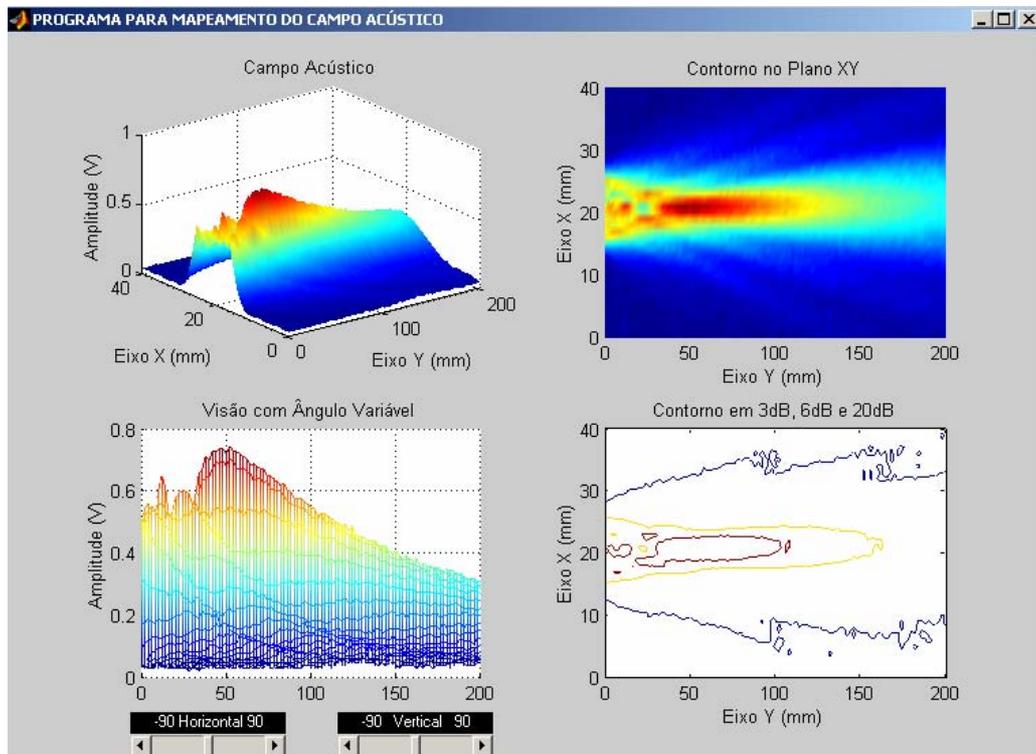
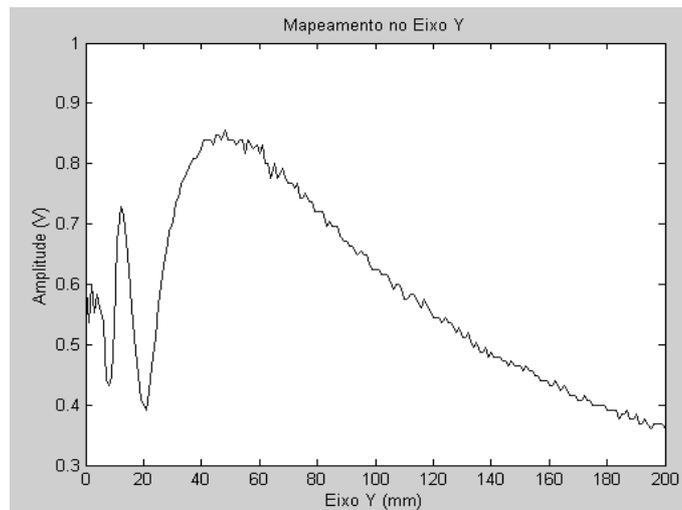
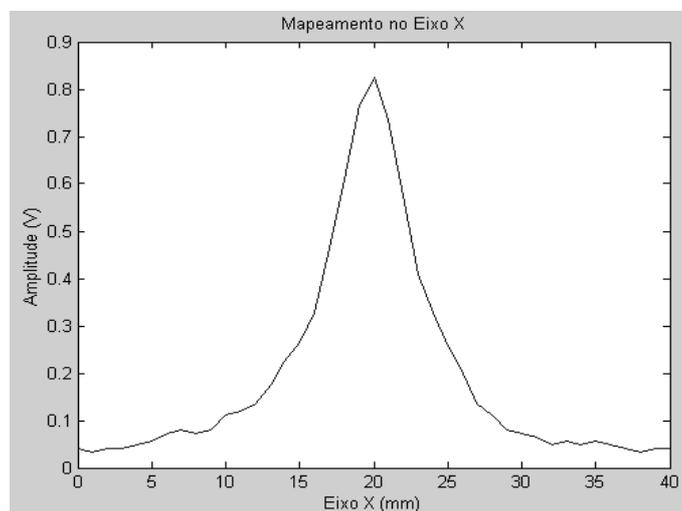


Figura III.13 Exemplo da representação do campo acústico gerada pelo programa MAPEAM, a partir do mapeamento realizado no plano XY.

Também foram realizados mapeamentos de 40mm ao longo do eixo X, como ilustrado na Figura III.14 (b), centralizados com o eixo axial, a 50mm, 100mm e 150mm de distância da face do transdutor. Além de confirmar o alinhamento do transdutor com o hidrofone receptor, estes mapeamentos permitem verificar a formação de lóbulos laterais na propagação do campo acústico.



(a)



(b)

Figura III.14 (a) Intensidade de campo ao longo do eixo Y (Linha Y) e (b) ao longo do eixo X (Linha X), a 50mm da face do transdutor.

### III. 7. 2 Pulso-eco e largura de banda

Outra medida realizada foi referente à análise da resposta do pulso refletido (eco) a partir de um refletor cilíndrico de alumínio de face plana. O pulso de RF do eco foi capturado a partir do osciloscópio através do programa “OSC2430”, e com o programa “LARGBANDA” em ambiente MATLAB, desenvolvidos no LUS pelo então doutorando Prof. Dr. Joaquim Miguel Maia (CEFET-PR), foram calculadas a FFT (Transformada Rápida de Fourier) do eco e a largura de banda ou faixa de passagem do transdutor. Foi

utilizado um alvo metálico de superfície plana para refletir o pulso acústico gerado pelo transdutor. Este alvo foi posicionado ao longo do eixo axial (Figura III.15), a uma distância da face do transdutor que corresponde à distância de separação dos campos próximo e distante.

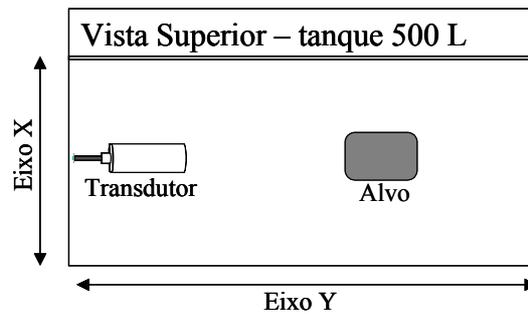


Figura III.15 Sistema de coordenadas adotado no tanque de medidas do Sistema de Mapeamento Acústico do LUS e o posicionamento do alvo refletor de superfície plana.

O exemplo de um sinal capturado (domínio do tempo) a partir do osciloscópio, e mostrado pelo programa LARGBANDA é apresentado na Figura III.16.

Os ecos foram gerados excitando-se os transdutores com um pulso retangular negativo ou um pulso senoidal de amplitude mínima 53Vpp, podendo, este pulso, alcançar até 150Vpp, na frequência de ressonância do modo espessura de cada transdutor, com taxa de repetição igual a 100Hz.

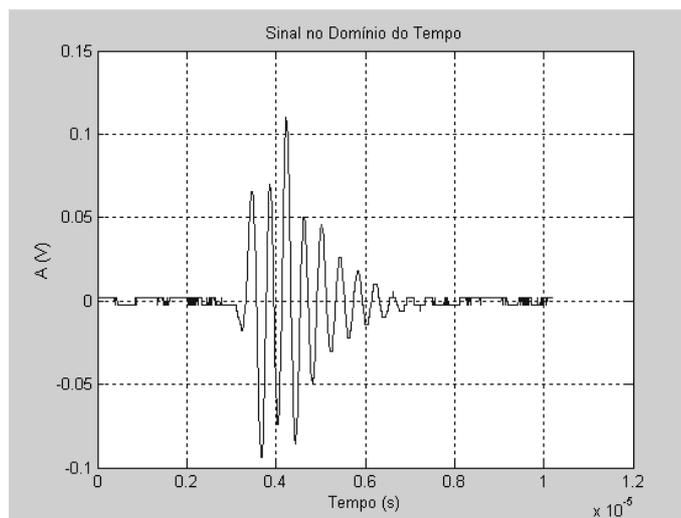


Figura III.16 Eco proveniente de um dos transdutores construídos, gerado por um pulso senoidal de excitação.

## **IV. TESTES E RESULTADOS**

### **IV.1 CERÂMICAS**

Nas curvas de Módulo de Impedância x Frequência e de Fase x Frequência traçadas por BUTTON (1998), para cerâmicas apodizadas e não apodizadas, a presença reduzida dos modos de vibração intermediários, entre o modo radial e o modo espessura, é a característica que diferencia as curvas de cerâmicas polarizadas das cerâmicas apodizadas. Estas curvas foram usadas para comparar as curvas traçadas para as cerâmicas apodizadas, de diversas maneiras, neste trabalho, além do valor do acoplamento eletromecânico efetivo do modo espessura. A cada conjunto de apodizações diferentes, o aspecto das curvas de Módulo e Fase da Impedância em função da Frequência, e o valor de “ $k_t$ ” foram usados como parâmetros para determinar quais resultados eram considerados válidos, e em função destes, foram realizadas novas apodizações variando-se o tempo de aplicação do campo elétrico e/ou a temperatura do banho de óleo isolante.

#### **IV.1.1 Cerâmicas polarizadas**

As cerâmicas piezoelétricas utilizadas, foram inicialmente avaliadas no analisador de impedâncias, para que suas frequências de ressonância e anti-ressonância fossem documentadas. Em função destes valores, calculamos o acoplamento eletromecânico efetivo obtido para os modos de vibração radial e espessura, conforme a Equação II.40. A tabela com as frequências de ressonância e anti-ressonância, e os fatores de acoplamento das cerâmicas da EDO Acoustics utilizadas é apresentada no Apêndice I.

As curvas de Módulo e Fase x Frequência obtidas para as cerâmicas polarizadas da EDO Acoustics com 0,885mm de espessura, são semelhantes, exibindo as mesmas formas de vibração em todos os casos. O que se observa, é uma pequena diferença entre os valores das frequências de ressonância e anti-ressonância e dos valores de acoplamento eletromecânico (que variam entre 0,45 e 0,48, com exceção de uma cerâmica para a qual se

obteve  $k = 0,51$ ). Nas cerâmicas polarizadas da APCI com 1mm de espessura, todos os fatores de acoplamentos obtidos apresentaram valores em torno de 0,45.

Um exemplo das curvas de fase *versus* frequência obtida é mostrado na Figura IV.1.

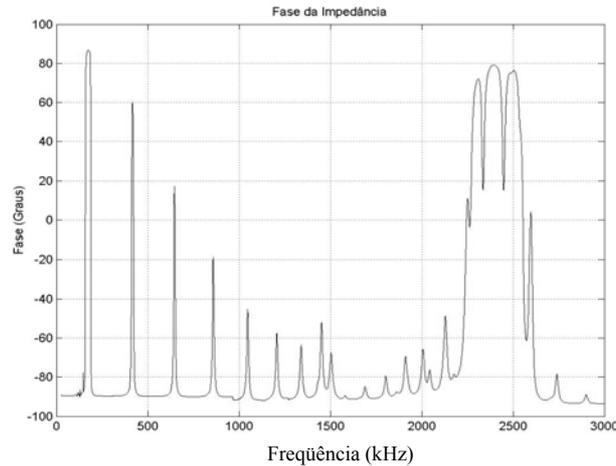


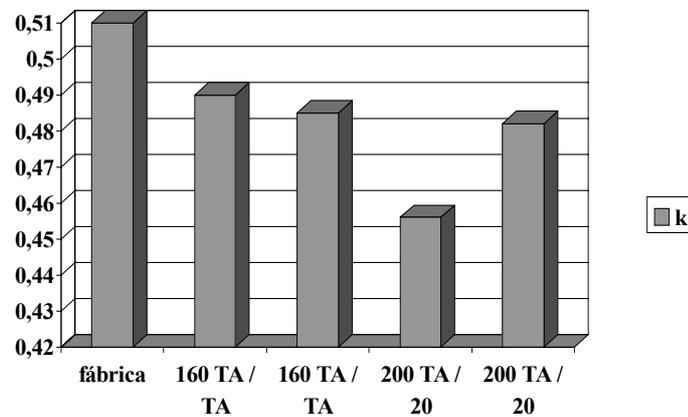
Figura IV.1 Curva de Fase da Impedância x Frequência de uma cerâmica polarizada.

#### IV.1.2 Cerâmicas apodizadas

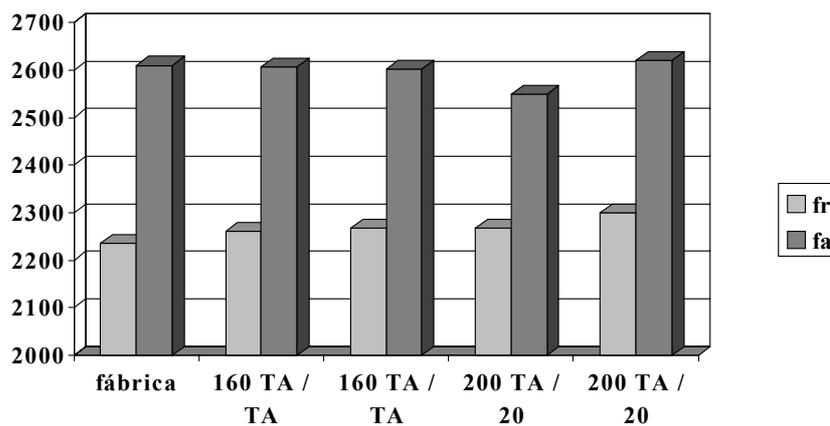
Mais de 40 cerâmicas foram utilizadas para realizar as variações nas apodizações. As cerâmicas que não alcançaram um resultado satisfatório foram despolarizadas e apodizadas novamente. Quando uma apodização era realizada, seu resultado era repetido para confirmação do valor obtido e quando a repetição não se enquadrava ao resultado original, o mesmo era repetido mais uma vez e então uma análise era feita para identificar os possíveis fatores da diferença dos dados. Apodizações realizadas apenas para confirmar um resultado já esperado, não foram repetidas.

Em função da necessidade de repolarizar algumas cerâmicas, para prosseguimento dos trabalhos, foi realizado um teste com uma cerâmica para saber se repolarizações sucessivas poderiam influenciar nas características de vibração da mesma e com isto ocasionar erro nas comparações realizadas. Uma cerâmica polarizada de fábrica foi despolarizada e repolarizada uniformemente, as curvas de módulo e fase em função da frequência foram

obtidas e o processo foi repetido mais três vezes, pois três repolarizações não-uniformes era a quantidade média de repolarizações efetuadas em uma única cerâmica. Duas repolarizações foram realizadas com o campo elétrico aplicado desde temperatura ambiente (TA) até o banho de óleo isolante, em que se encontra a cerâmica, ser aquecido a 160°C, e o mesmo resfriar até a temperatura ambiente novamente (TA). A mesma cerâmica foi despolarizada novamente e repolarizada uniformemente por mais duas vezes, porém, com o campo elétrico aplicado desde a temperatura ambiente (TA) até a cerâmica atingir 200°C durante apenas mais 20 minutos enquanto a cerâmica resfriava. O gráfico da Figura.IV.2 (a) ilustra os acoplamentos eletromecânicos “k” obtidos e o gráfico da Figura.IV.2 (b) ilustra as frequências de ressonância e anti-ressonância resultantes.



(a)



(b)

Figura IV.2 Resultados dos testes de repolarizações, (a) acoplamento eletromecânico, “ $k_t$ ” e (b) frequências de ressonância e anti-ressonância obtidas em função da apodização.

#### IV.1.2.1 Variações de temperatura

Nos trabalho realizado por BUTTON (1998), as cerâmicas foram apodizadas com o campo elétrico aplicado quando a temperatura do banho de óleo isolante atingia 160°C, e permanecia aplicado até a temperatura do óleo retornar à temperatura ambiente (TA). Neste trabalho, apodizações foram realizadas, sob as mesmas condições, mas utilizando quatro temperaturas diferentes a princípio, 120°C, 140°C, 160°C e 200°C; os acoplamentos resultantes são apresentados na Figura IV.3. A documentação destas cerâmicas apodizadas se encontra no Apêndice II.

Os resultados considerados bons apresentaram um acoplamento eletromecânico do modo espessura  $k > 0,37$  e curvas de Fase da Impedância x Freqüência com redução nos modos intermediários de vibração, conforme observa-se comparando as Figuras IV.1 e IV.4. As cerâmicas que não apresentaram redução dos modos intermediários de vibração foram consideradas uniformemente polarizadas.

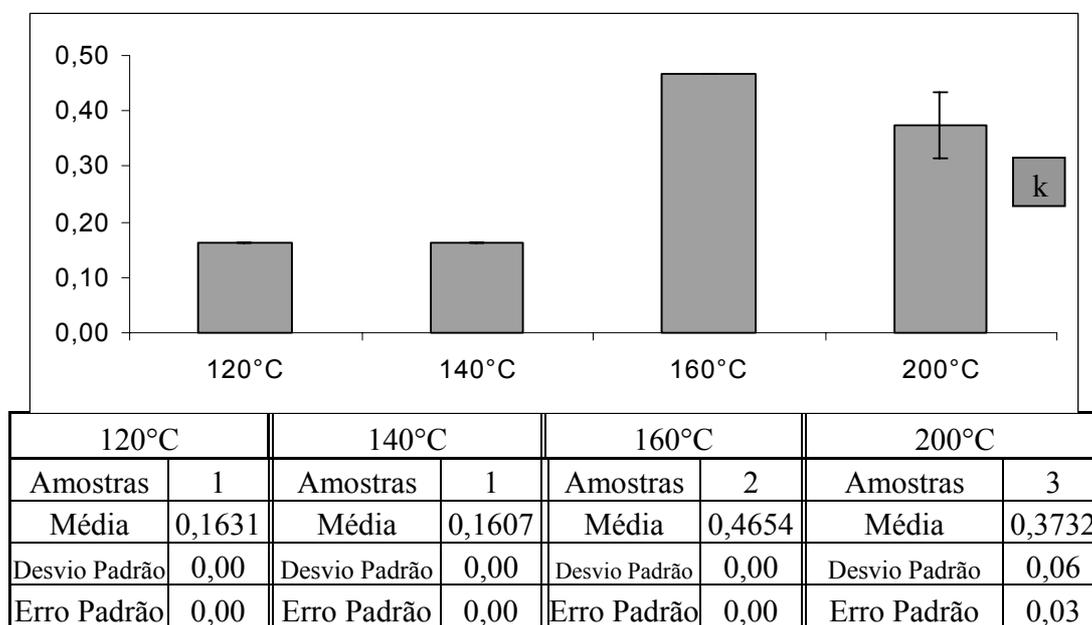


Figura IV.3. k, erro padrão (gráfico) e desvio padrão nas apodizações com variação de temperatura e com o campo aplicado desde a temperatura indicada até TA.

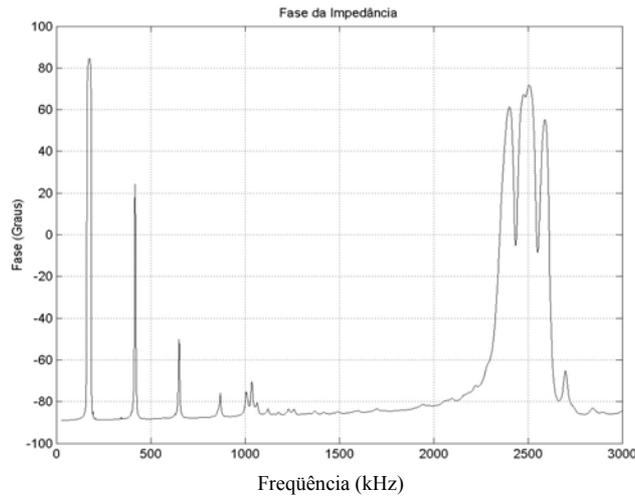
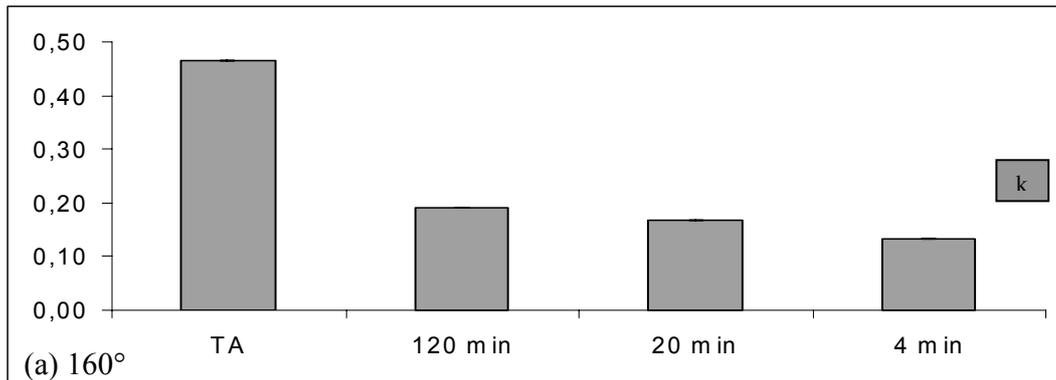


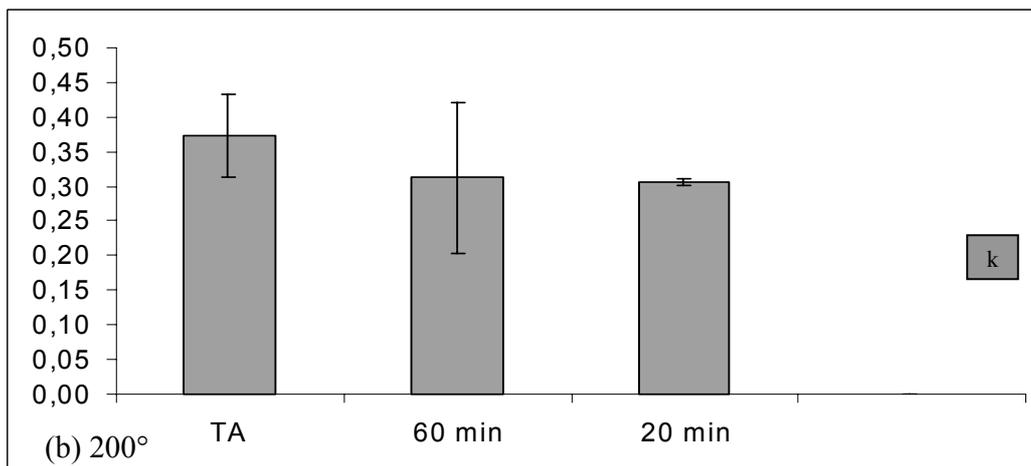
Figura IV.4 Gráfico de Fase da Impedância x Freqüência de uma cerâmica apodizada com  $k$  do modo espessura maior que 0,37.

#### IV.1.2.2 Variação do tempo de aplicação do campo elétrico de apodização

Em função dos resultados obtidos até esta fase do trabalho, outros testes foram realizados com redução do tempo de aplicação do campo elétrico para temperaturas a 160°C e 200°C; os resultados estão resumidos na Figura IV.5 (a) 160°C e (b) 200°C.



TA		120 minutos		20 minutos		4 minutos	
Amostras	2	Amostras	1	Amostras	1	Amostras	1
Média	0,4654	Média	0,1912	Média	0,1677	Média	0,1316
Desvio Padrão	0,00						
Erro Padrão	0,00						



TA		60 min		20 min	
Amostras	3	Amostras	2	Amostras	2
Média	0,3732	Média	0,3125	Média	0,3059
Desvio Padrão	0,06	Desvio Padrão	0,11	Desvio Padrão	0,01
Erro Padrão	0,03	Erro Padrão	0,08	Erro Padrão	0,00

Figura IV.5. k, erro padrão e desvio padrão nas apodizações com variação do tempo de aplicação do campo elétrico a; (a) 160°C e (b) 200°C .

### IV.1.2.3 Variações com campo elétrico aplicado desde temperatura ambiente (TA)

Visando facilitar o alinhamento dos dipolos elétricos com o campo elétrico externo, foram realizados testes em que o campo elétrico começava a ser aplicado desde a temperatura ambiente. O objetivo era fazer que, assim que os dipolos elétricos começassem a relaxar devido ao aumento da temperatura, eles já tendessem a se alinhar com o campo aplicado, facilitando o alinhamento quando o óleo atingisse a temperatura desejada. Os tempos de apodização indicados na Figura IV.6 160°C e na Figura IV.7 200°C, não incluem o tempo em que o campo elétrico já está aplicado, que demora para o óleo ser aquecido da temperatura ambiente (TA) até a temperatura indicada. O tempo gasto para alcançar 160°C e 200°C, é de 8 e 10 minutos, respectivamente.

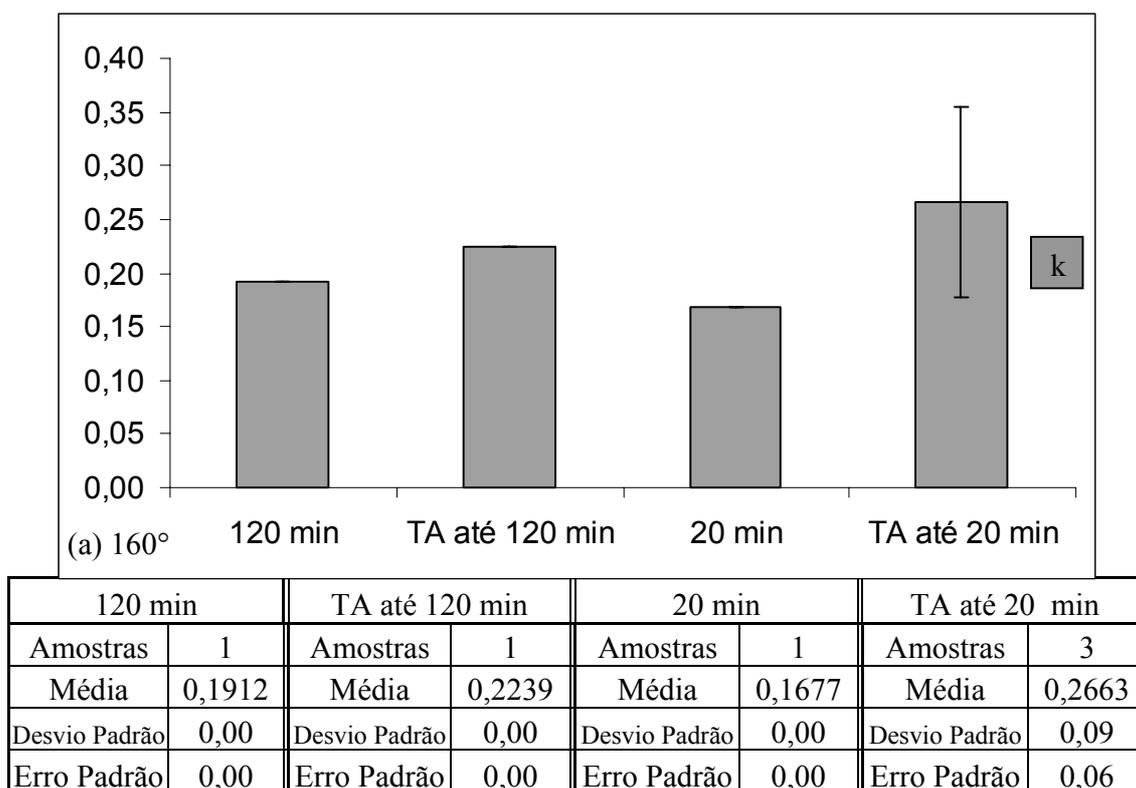
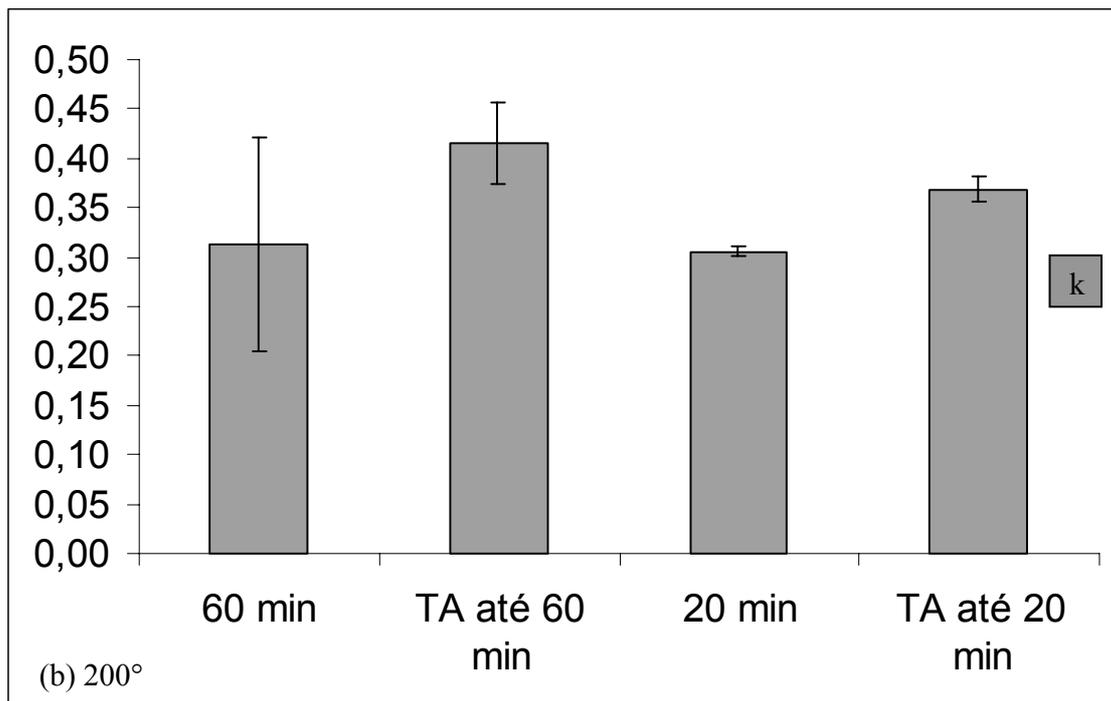


Figura IV.6 Comparações entre apodizações com campo aplicado ao atingir a temperatura desejada e apodizações com campo aplicado desde TA até 160°C e durante um determinado intervalo de 20 minutos ou de 120 minutos.



60 min		TA até 60 min		20 min		TA até 20 min	
Amostras	2	Amostras	4	Amostras	2	Amostras	6
Média	0,3125	Média	0,4155	Média	0,3059	Média	0,3686
Desvio Padrão	0,11	Desvio Padrão	0,04	Desvio Padrão	0,01	Desvio Padrão	0,01
Erro Padrão	0,08	Erro Padrão	0,02	Erro Padrão	0,00	Erro Padrão	0,00

Figura IV.7 Comparações entre apodizações com campo aplicado ao atingir a temperatura desejada e apodizações com campo aplicado desde TA até 200°C e durante um determinado intervalo de 20 minutos ou de 120 minutos.

#### IV.1.2.4 Variações de tempo de aplicação do campo (1) mantendo a temperatura constante (200°C) durante a aplicação do campo elétrico e (2) a temperaturas mais elevadas (220°C e 250°C), mas não constantes.

Foram realizados testes com a temperatura do óleo a 200°C sendo mantida constante durante o tempo de aplicação do campo elétrico. Nestes testes, o campo já era aplicado desde a temperatura ambiente e quando o óleo atingia 200°C, o mesmo era mantido constante por mais 20, 10 ou 5 minutos, quando o campo aplicado era retirado (Figuras IV.8 e IV.9).

Também foram feitos testes com temperaturas mais elevadas, 220°C e 250°C. Com 220°C, o campo foi aplicado desde a temperatura ambiente (TA) e por mais 5 ou 20 minutos depois do óleo atingir esta temperatura (Figuras IV.8 e IV.9). A 250°C, o campo foi aplicado desde 200°C, ou apenas quando o óleo atingisse 250°C e por mais 5 minutos após a temperatura do óleo atingir 250°C. A variação da temperatura na qual o campo de apodização era aplicado, foi feita para avaliar se com 250°C, aplicar o campo antes do óleo atingir esta temperatura facilitaria o processo de apodização, ou se a 250°C o relaxamento dos dipolos é tão intenso, que os dipolos encontram a mesma facilidade para se alinhar com o campo externo, seja ele aplicado desde 200°C, ou só após esta temperatura ser atingida (Figura IV.9).

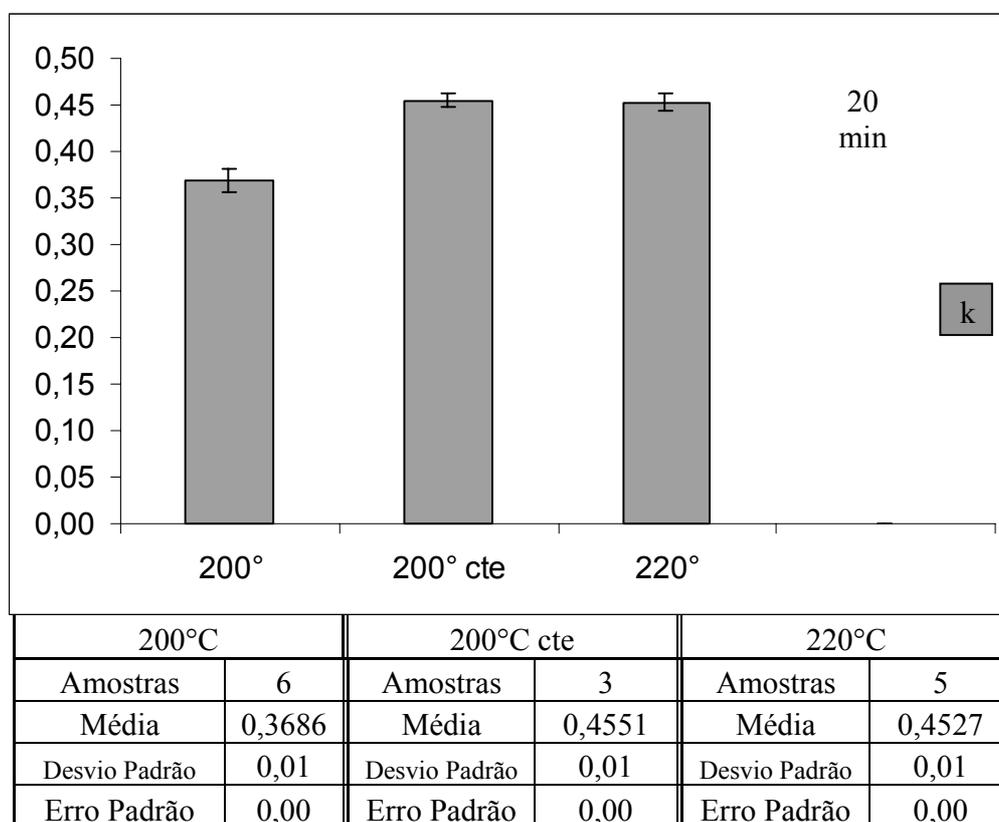
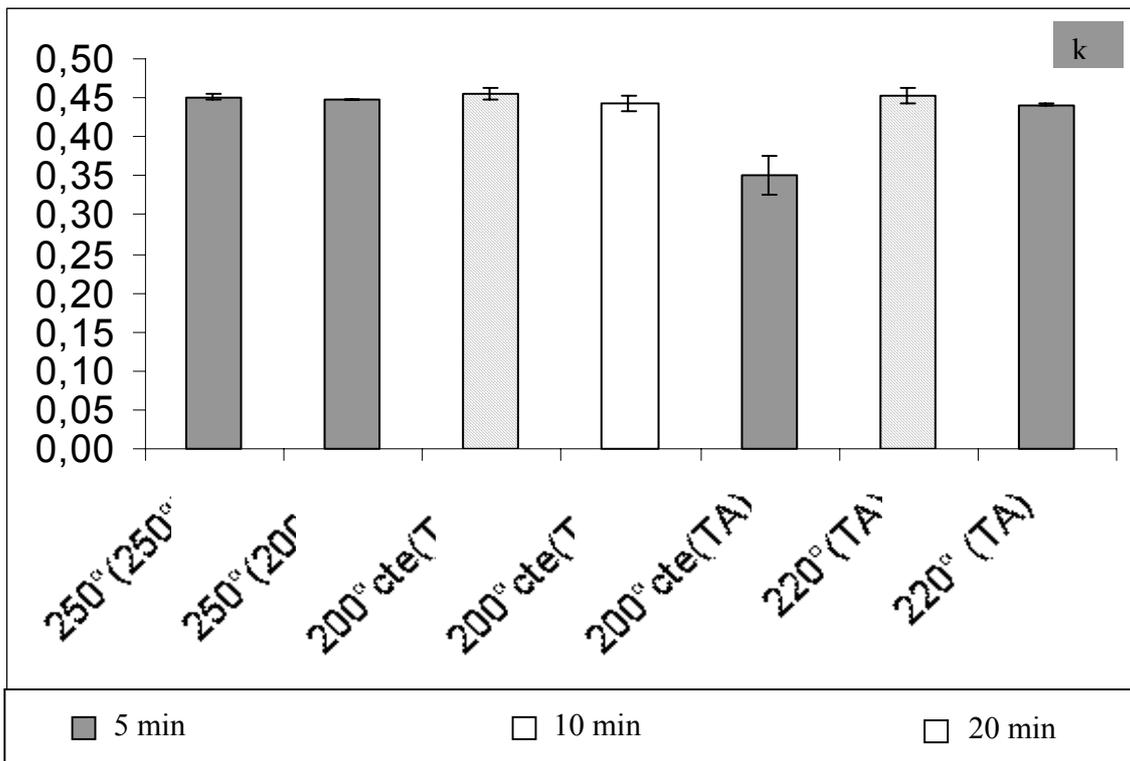


Figura IV.8 Comparações entre apodizações com o campo aplicado desde TA até 200°C, a 200°C, com campo constante, e a 220° C e por mais 20 minutos.



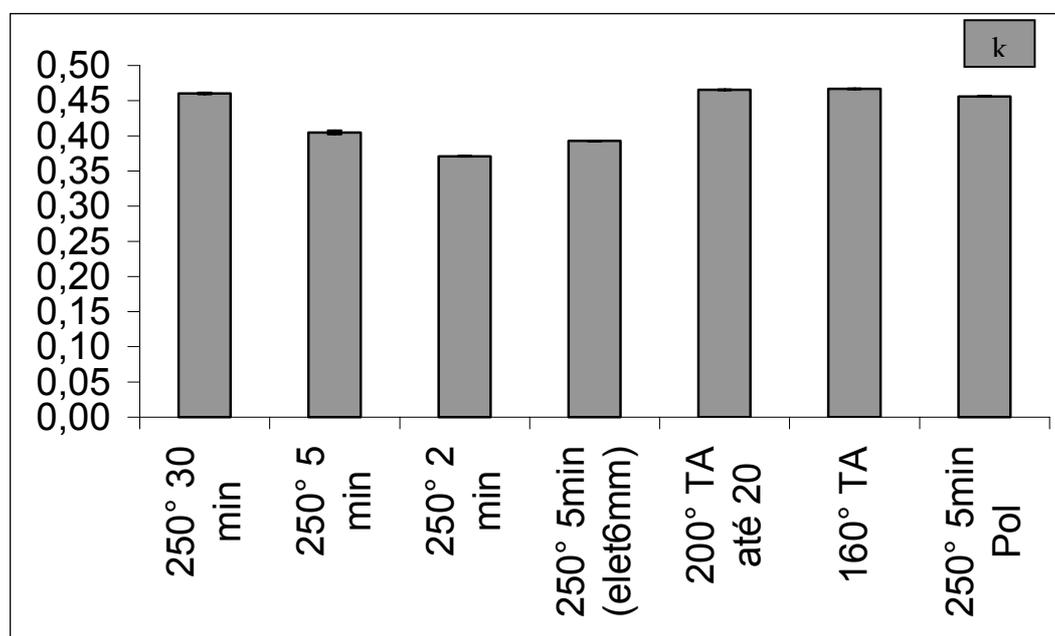
250°(250°) 5 min		250°(200°) 5 min		200°cte(TA) 20 min		200°cte(TA) 10 min	
Amostras	3	Amostras	1	Amostras	3	Amostras	3
Média	0,4514	Média	0,4468	Média	0,4551	Média	0,4431
Desvio Padrão	0,00	Desvio Padrão	0,00	Desvio Padrão	0,01	Desvio Padrão	0,01
Erro Padrão	0,00	Erro Padrão	0,00	Erro Padrão	0,00	Erro Padrão	0,01

200°cte(TA) 5 min		220°(TA) 20 min		220°(TA) 5 min	
Amostras	2	Amostras	5	Amostras	2
Média	0,3508	Média	0,4527	Média	0,4412
Desvio Padrão	0,03	Desvio Padrão	0,01	Desvio Padrão	0,00
Erro Padrão	0,02	Erro Padrão	0,00	Erro Padrão	0,00

Figura IV.9 Comparações entre o k resultante de apodizações feitas com temperaturas diferentes, com o campo aplicado desde TA ou numa determinada temperatura (indicada entre parênteses), por um intervalo de tempo entre 5 e 20 minutos, durante o qual o campo podia ser mantido constante.

#### IV.1.2.5 Apodizações feitas com as cerâmicas APCI

As apodizações das cerâmicas APCI foram realizadas com temperaturas diferentes (250°, 200°, 160°), variando o tempo de aplicação do campo elétrico (desde atingida a temperatura, até resfriar (TA) ou por 2, 5 ou 30 minutos após atingida a temperatura, e desde TA até 20 minutos após atingida a temperatura) e uma apodização variando o tamanho do eletrodo esférico (raio = 3mm). Todas as apodizações foram feitas mantendo-se a relação de 2kV/mm de espessura de cerâmica. Foi realizada também uma polarização a 250°C (5 min) com campo aplicado de 1kV/mm (Figura IV.10).



250° 30 min		250° 5 min		250° 2 min		250° 5min (elet3mm)	
Amostras	2	Amostras	3	Amostras	1	Amostras	1
Média	0,4603	Média	0,4048	Média	0,3706	Média	0,3927
Desvio Padrão	0,00	Desvio Padrão	0,00	Desvio Padrão	0,00	Desvio Padrão	0,00
Erro Padrão	0,00	Erro Padrão	0,00	Erro Padrão	0,00	Erro Padrão	0,00
200° TA até 20		160° TA		250° 5min Pol			
Amostras	1	Amostras	1	Amostras	1		
Média	0,4656	Média	0,4669	Média	0,4560		
Desvio Padrão	0,00	Desvio Padrão	0,00	Desvio Padrão	0,00		
Erro Padrão	0,00	Erro Padrão	0,00	Erro Padrão	0,00		

Figura IV.10 Comparações entre k resultantes das variações nas apodizações e numa polarização, realizadas com cerâmica APCI.

## IV.2 TRANSDUTORES

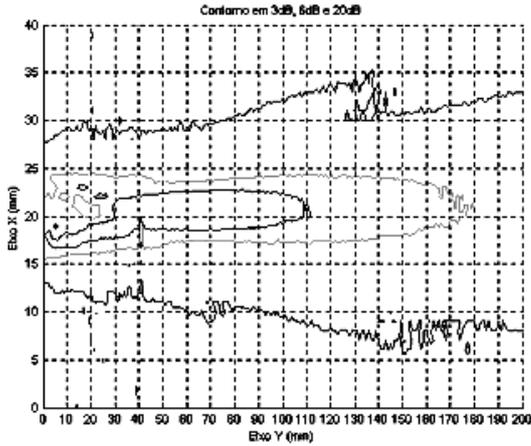
Transdutores de ultra-som foram construídos com algumas cerâmicas apodizadas que apresentaram acoplamento eletromecânico satisfatório. Também foram construídos transdutores com cerâmicas polarizadas uniformemente para poder comparar seus desempenhos aos dos transdutores com cerâmicas apodizadas. Os resultados serão apresentados na seqüência em que os testes foram realizados para facilitar a compreensão das conclusões apresentadas no Capítulo V (Discussão e Conclusão).

### IV.2.1 Transdutores com cerâmicas EDO e *backing* de tungstênio

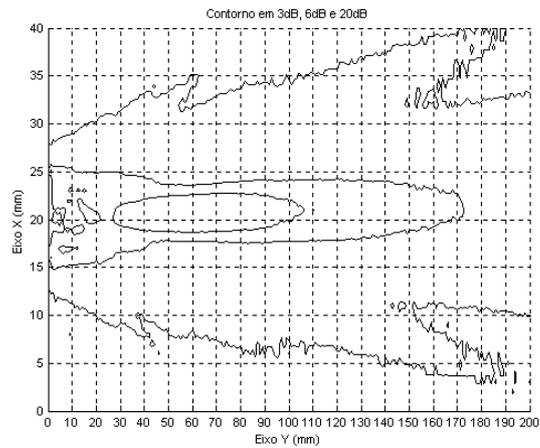
Com esta configuração foram construídos 21 transdutores de ultra-som, sendo que 2 transdutores apresentaram problemas nas etapas de construção e foram descartados, e 3 foram construídos com cerâmicas polarizadas de fábrica.

#### IV.2.1.1 Mapeamento do campo acústico no plano XY

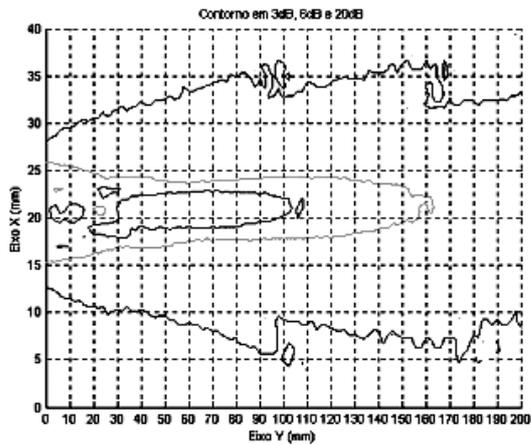
O mapeamento, no plano XY, do campo acústico gerado por alguns transdutores polarizados e por alguns transdutores apodizados foi realizado. Os contornos de intensidades de -3dB, -6dB e -20dB, em relação à intensidade máxima do campo foram utilizados para representar o campo acústico dos transdutores construídos. Os resultados obtidos são ilustrados na Figura IV.11, sendo que em (a) e (b) são mostrados os campos de transdutores polarizados, em (c) o campo de um transdutor apodizado a 160°C com o campo aplicado até que o óleo resfriasse a TA, em (d) o campo de um transdutor apodizado a 200° com campo aplicado de TA até TA, em (e) o campo de um transdutor apodizado a 200°C desde TA até 20 minutos após atingir 200°C e em (f), o campo de um transdutor apodizado desde TA até 20 minutos após atingir 220°C. Não inclui transdutores construídos com cerâmicas apodizadas a 250°C.



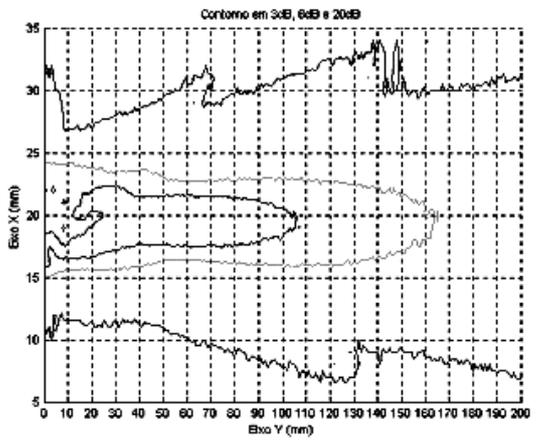
(a) Mt 31 polarizado



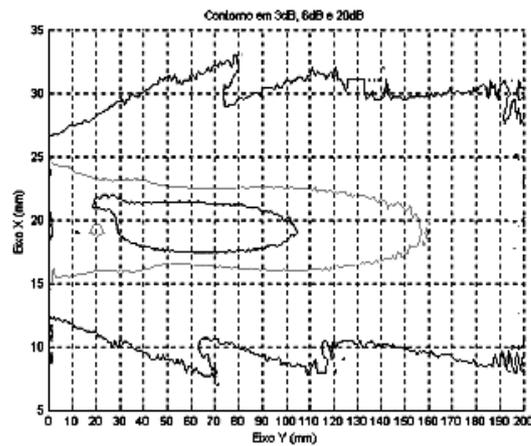
(b) Mt 32 polarizado



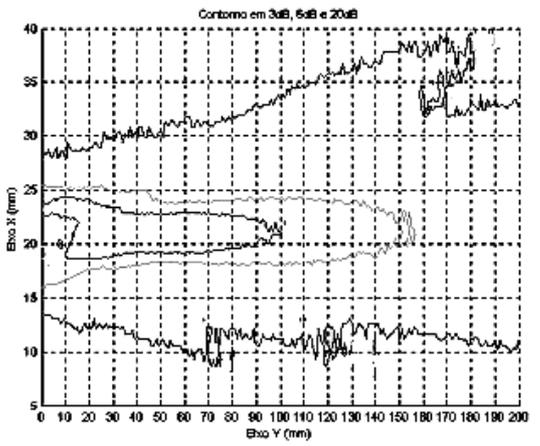
(c) Mt 01 apodizado 160° até TA



(d) Mt 08 apodizado 200° TA até TA



(e) Mt 05 apodizado 200° TA até 20



(f) Mt 16 apodizado 220° TA até 20

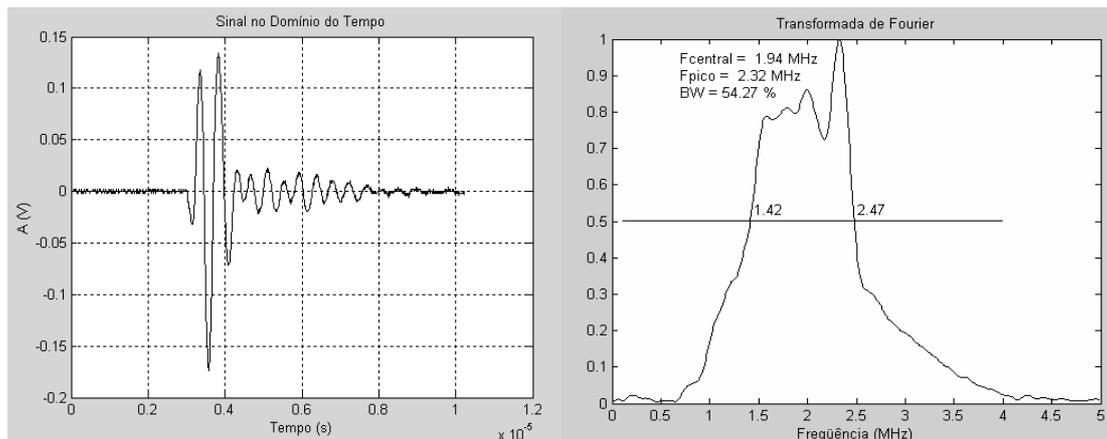
Figura IV.11 Mapeamento dos transdutores no eixo XY (linhas; -3dB(mais interna), -6dB e -20dB(mais externa)). (a) e (b) polarizados e (c), (d), (e) e (f) apodizados.

#### **IV.2.1.2 Pulso-eco**

Nesta fase de testes foram feitas medidas do pulso ultra-sônico gerado pelos transdutores, e capturado por hidrofone pontual, e medidas do eco do pulso refletido por um alvo plano de alumínio posicionado no início do campo distante, ao longo do eixo axial. A excitação do transdutor foi feita por um pulso senoidal e/ou por um pulso retangular negativo, na frequência de ressonância do modo espessura, e repetido a 100Hz. Para o pulso e para o eco também foi calculada a largura da banda de passagem, com o programa LARGBANDA.

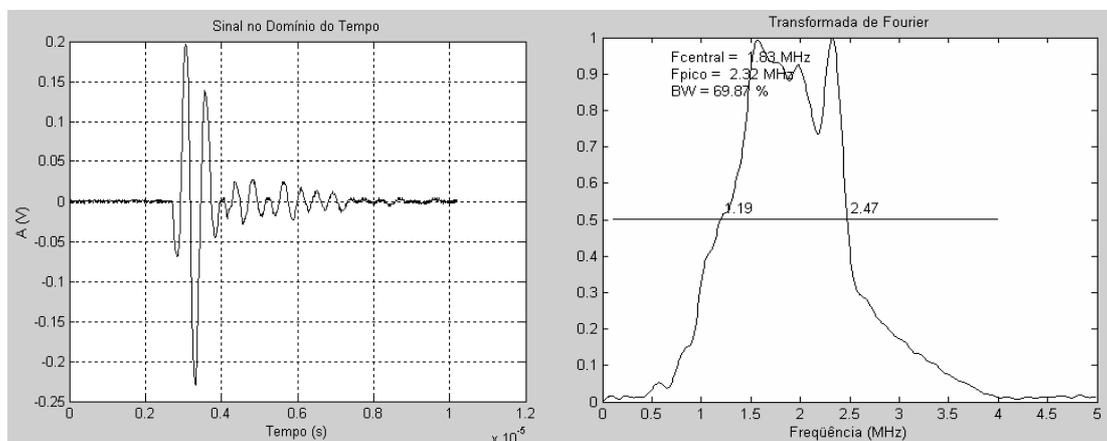
As Figuras IV.12 e IV.13 mostram o pulso captado pelo hidrofone, o eco e a resposta em frequência (de um transdutor polarizado e de um transdutor apodizado, respectivamente). Na maioria dos transdutores construídos até esta fase do trabalho, o eco apresentava valores muito baixos de amplitude, e com interferência dos ruídos presentes no sistema de medição, ficava impossível capturá-los. Em quase todos os casos não foi possível calcular a largura de banda proveniente de ecos.

Estes resultados serão discutidos e justificados no Capítulo V.



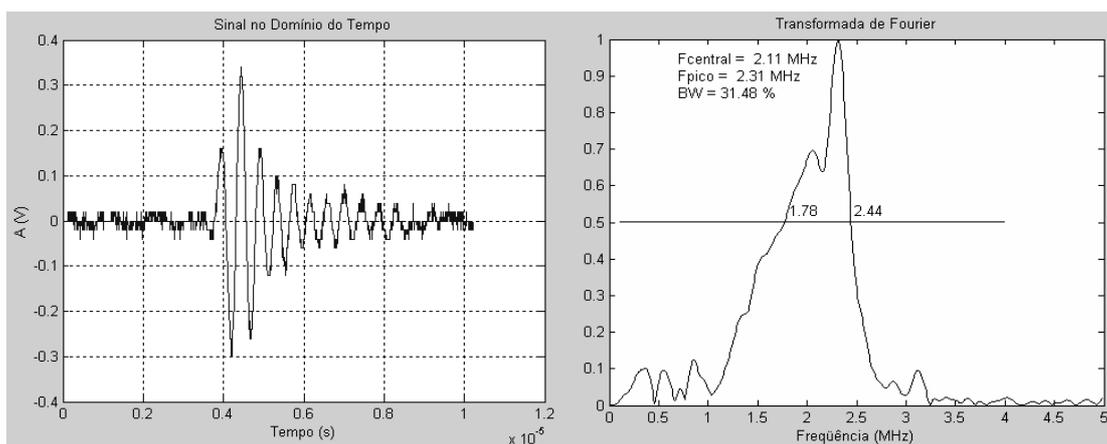
(a)

(b)



(c)

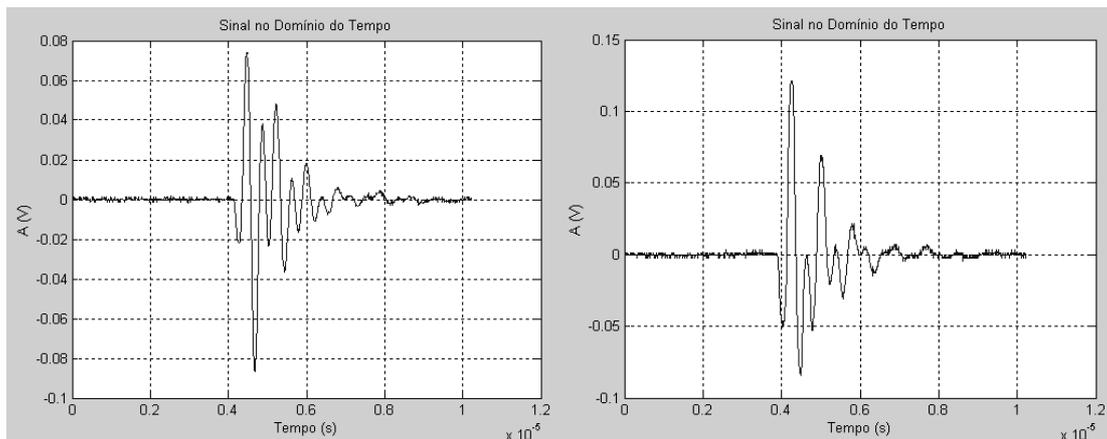
(d)



(e)

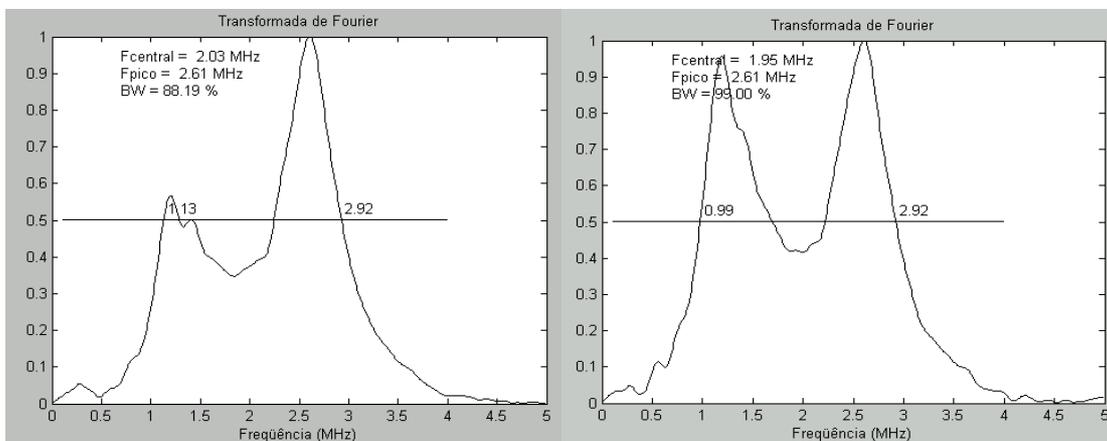
(f)

Figura IV.12. Mt 31 (transdutor polarizado). (a) e (c) pulso captado pelo hidrofone, excitações senoidal e retangular; (e) eco, do pulso retangular, captado; (b), (d) e (f) larguras de banda obtidas, respectivamente.



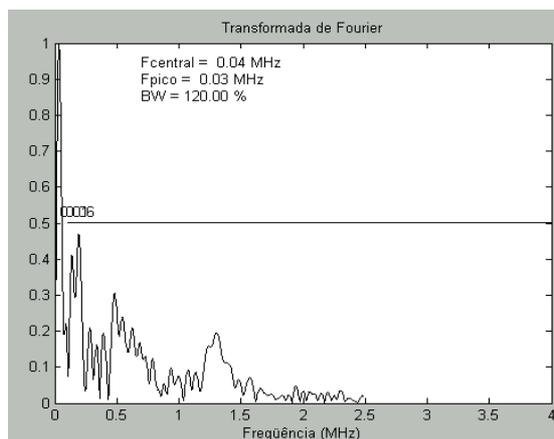
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figura IV.13 Mt 01 (transdutor apodizado). (a) e (b) pulso captado pelo hidrofone, com excitação senoidal e retangular respectivamente; (c) e (d) larguras de banda obtidas, respectivamente e (e), espectro de frequência proveniente do eco.

#### IV.2.2 Transdutores com cerâmicas EDO e *backing* de alumina

Em função dos resultados obtidos com os transdutores anteriores, com *backing* de tungstênio (pulsos de baixa intensidade e longos), construiu-se transdutores com *backing* de alumina. Foram construídos 5 transdutores, sendo que 2 destes foram com cerâmica polarizada e 2 destes com cerâmicas apodizadas a 250°C e com o campo aplicado por 5 minutos após atingir os 250°C.

Todas as fases de construção destes transdutores foram acompanhadas pela obtenção das curvas de módulo e fase da impedância *versus* frequência, que estão resumidas na Tabela IV.1, para detectar e corrigir eventuais problemas. Nestes transdutores também foi feita a compatibilização elétrica, com a colocação de um indutor em paralelo com a cerâmica, para verificar se causava diferenças nos resultados obtidos.

Tabela IV.1 Coeficiente de acoplamento “k” do modo espessura e frequências de ressonância e anti-ressonância medidas nos transdutores após cada etapa de construção.

etapas	Transdutores	38P	41P	39P	42P
	Parâmetros				
livre	freq Res	2240	2225	2332	2328
	freq AnR	2555	2516	2609	2615
	k	0,4810	0,4668	0,4484	0,4554
s/backing	freq Res	2232	2222	2316	2316
	freq AnR	2546	2512	2602	2615,5
	k	0,4810	0,4664	0,4558	0,4646
c/backing	freq Res	2217	2192	2300	2305
	freq AnR	2608	2560	2667	2693
	k	0,5266	0,5165	0,5062	0,5171
c/latão	freq Res	2219	2194,5	2301,5	2305
	freq AnR	2609	2561	2664	2692
	k	0,5259	0,5154	0,5036	0,5165
c/pvc	freq Res	2209	2174	2283,5	2317
	freq AnR	2612,5	2514	2638	2621
	k	0,5232	0,5041	0,4936	0,4674
montado	freq Res	1993	2003	2085	2105
	freq AnR	2619	2315	2429	2430
	k	0,6487	0,5013	0,5130	0,4996
c/indutor	freq Res	2097	2088,5	2195	2122
	freq AnR	2875	2849	2689,5	2432,5
	k	0,6841	0,6801	0,5778	0,4888

A Figura IV.14 apresenta as curvas de Fase da Impedância x Frequência após as etapas de construção do transdutor polarizado Mt 38.

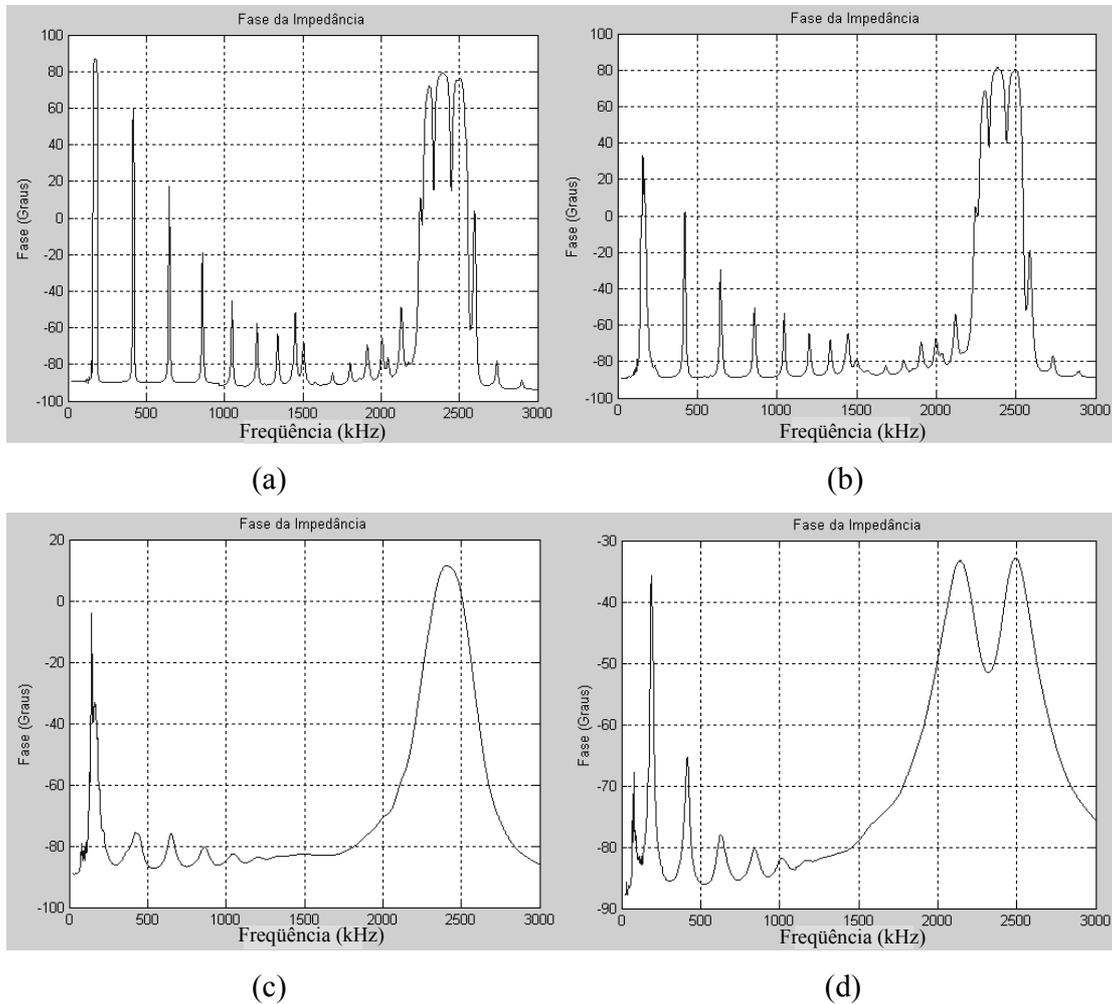


Figura IV.14 Curvas de Fase x Frequência traçadas após cada uma das etapas de construção do transdutor Mt 38 polarizado: (a) cerâmica vibrando livre; (b) sem *backing*; (c) com *backing*; e (d) transdutor montado.

A Figura IV.15 apresenta os mesmos tipos de curvas, mas para o transdutor apodizado Mt 39. As Figuras IV.16 e IV.17 complementam os gráficos para o transdutor Mt 41 polarizado e para o transdutor Mt 42 apodizado, respectivamente.

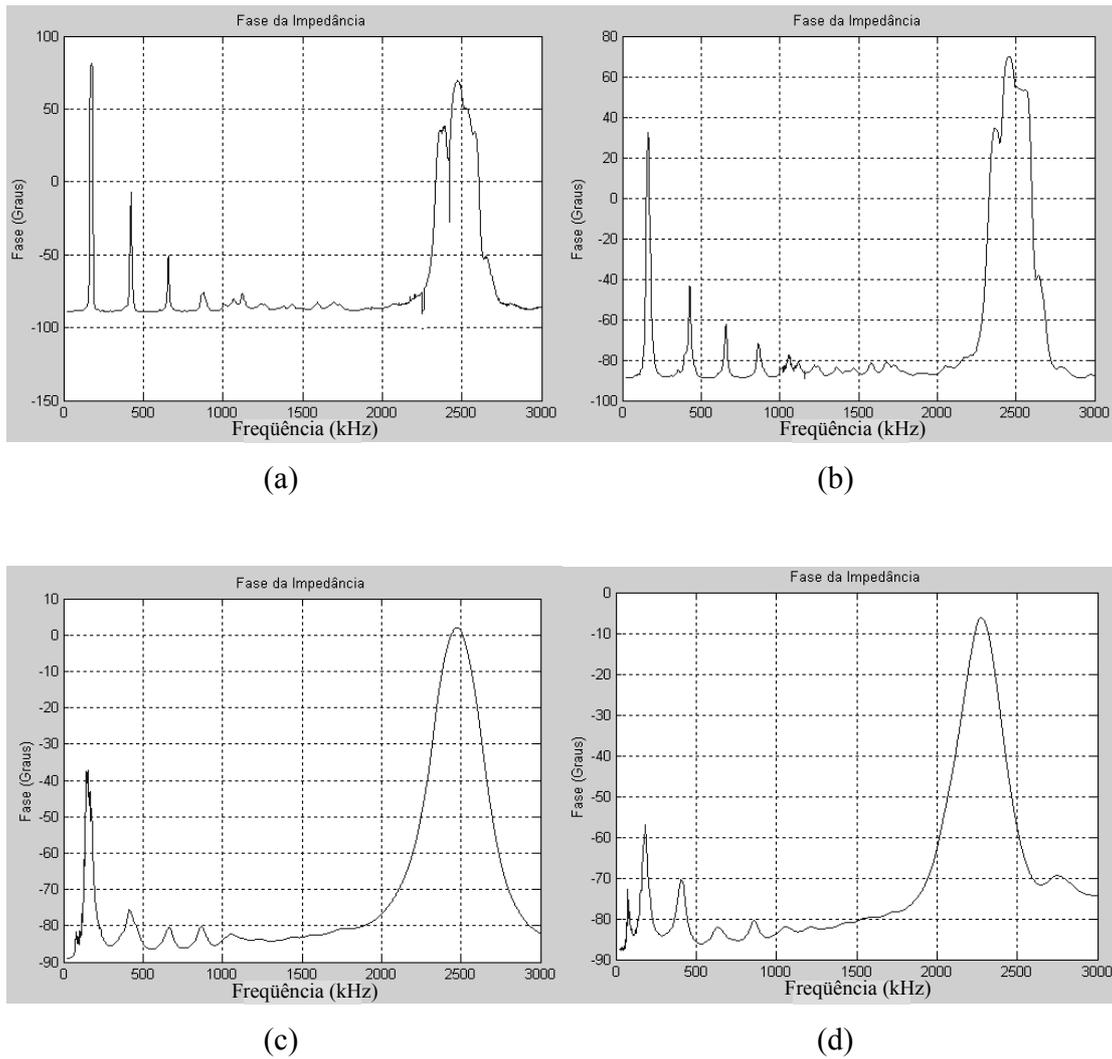
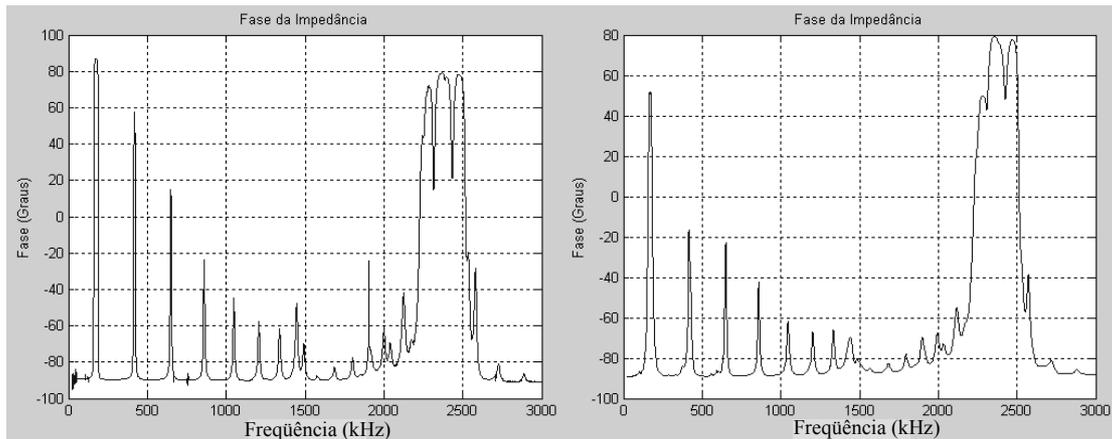
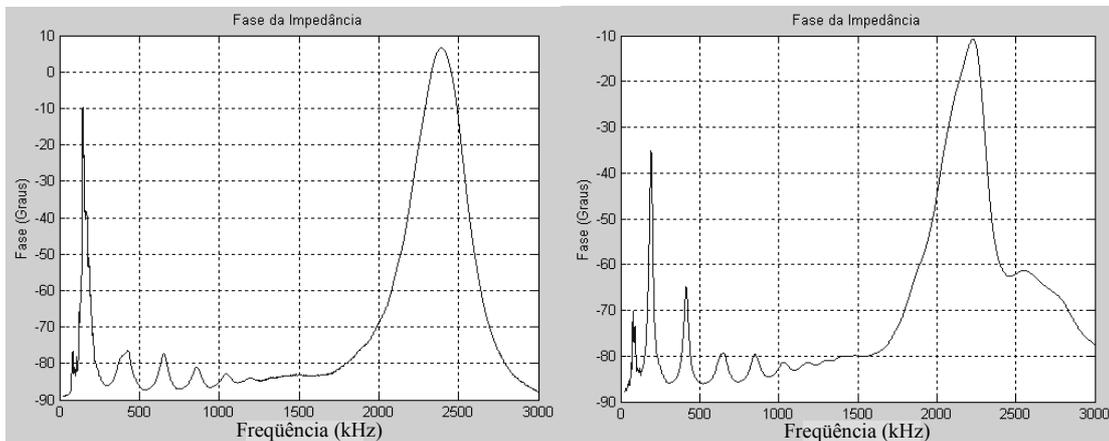


Figura IV.15 Curvas de Fase x Frequência traçadas após cada uma das etapas de construção do transdutor Mt 39 apodizado: (a) cerâmica vibrando livre; (b) sem *backing*; (c) com *backing*; e (d) transdutor montado.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura IV.16. Curvas de Fase x Frequência traçadas após cada uma das etapas de construção do transdutor Mt 41 polarizado: (a) cerâmica vibrando livre; (b) sem *backing*; (c) com *backing*; e (d) transdutor montado.

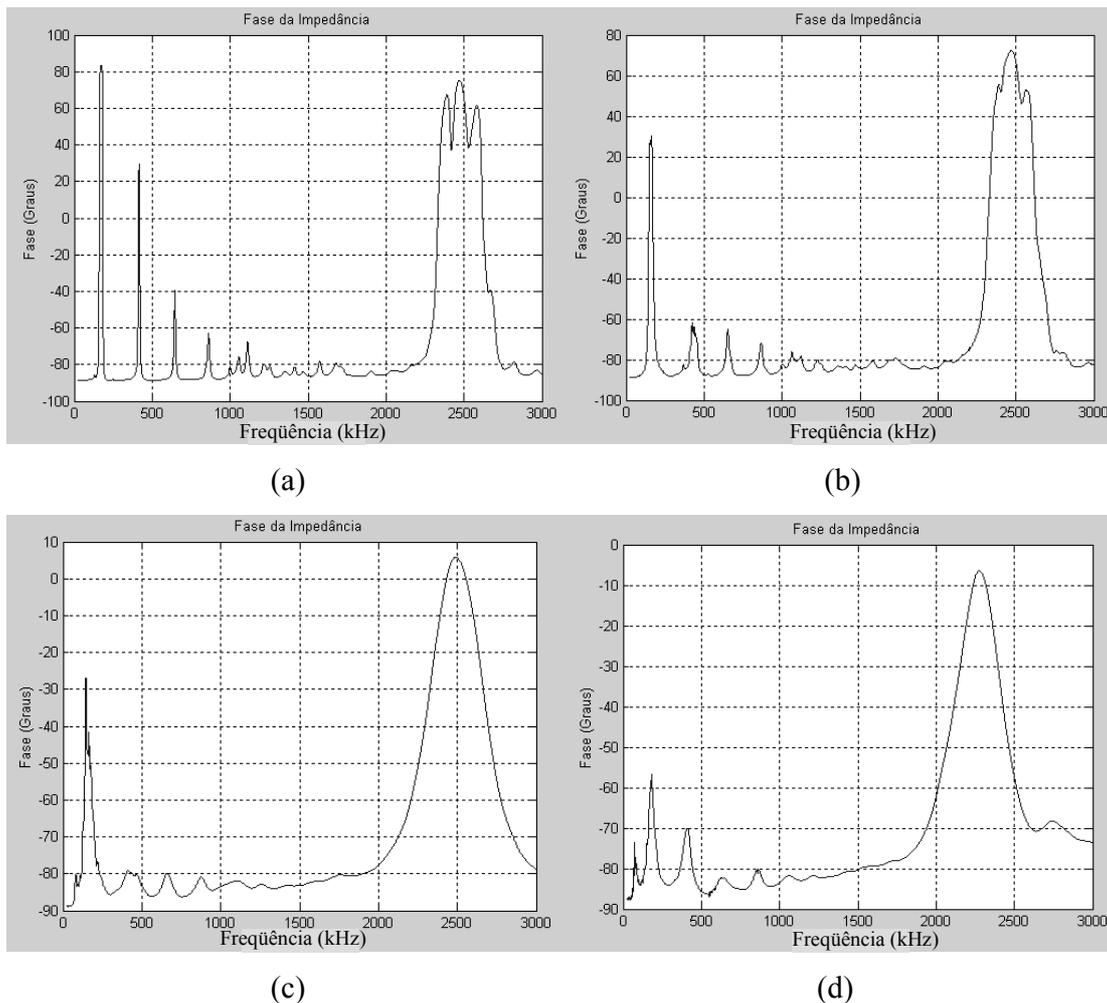


Figura IV.17. Curvas de Fase x Frequência traçadas após cada uma das etapas de construção do transdutor Mt 42 apodizado: (a) cerâmica vibrando livre; (b) sem *backing*; (c) com *backing*; e (d) transdutor montado.

#### IV.2.2.1 Compatibilização Elétrica com utilização de indutores em paralelo

Inicialmente os transdutores foram montados sem a colocação do indutor de compatibilização elétrica, pois os valores calculados a partir da capacitância “erroneamente” medida na frequência de ressonância (faixa de  $\eta F$ ), foram considerados baixos. Erroneamente, pois o objetivo é anular a capacitância intrínseca da cerâmica (e não a baixíssima capacitância na ressonância) que deveria ser medida em baixa frequência (em torno de 1kHz). O erro foi constatado somente após já se ter testado indutores de valores maiores; semelhantes aos de BUTTON (1998). Os indutores usados foram aqueles que na

freqüência de ressonância do transdutor, resultavam na fase da impedância mais próxima de zero, ou seja, mais puramente resistiva, alcançando desta forma o objetivo. A Figura IV.18 ilustra os gráficos de Módulo e Fase de Impedância x Freqüência do transdutor Mt 39 (a) com indutor de  $1,8\mu\text{H}$ , (b) com indutor de  $2,2\mu\text{H}$ .

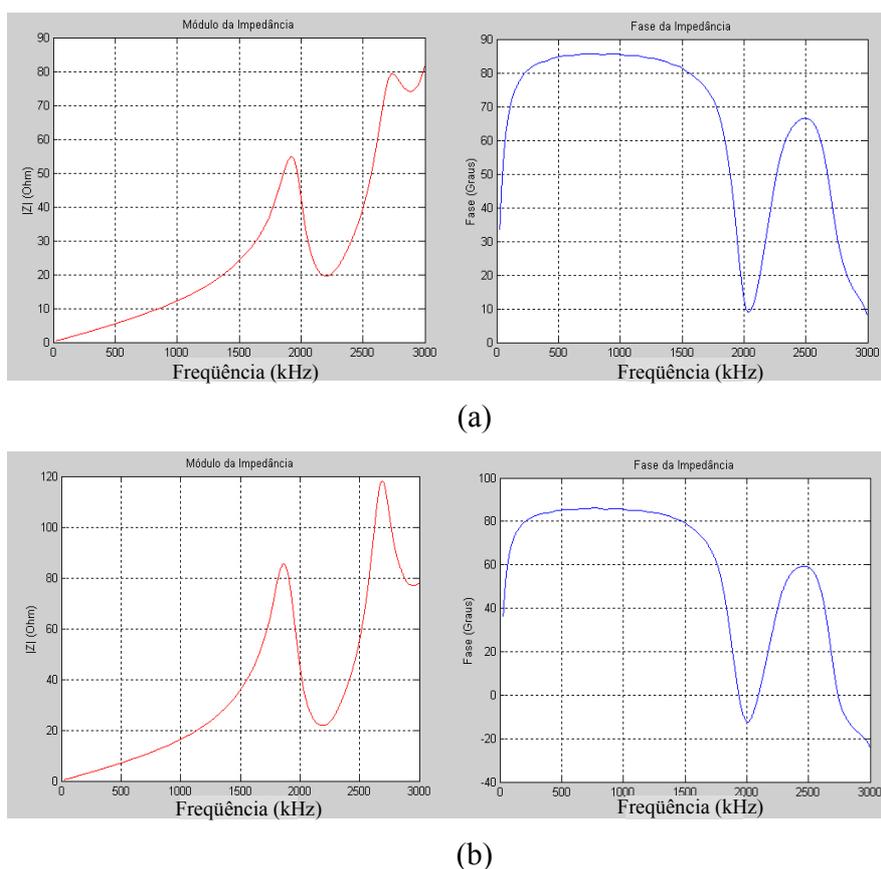


Figura IV.18 Curvas de Módulo e Fase da Impedância x Freqüência do transdutor apodizado Mt 39 (a) com indutor de  $1,8\mu\text{H}$ ; e (b) com indutor de  $2,2\mu\text{H}$ .

Os valores de indutância que tornaram a fase da impedância mais próxima de zero na freqüência de ressonância de cada transdutor construído são apresentados na Tabela IV.2

Tabela IV.2 Valores de indutância utilizados para compatibilização elétrica dos transdutores (determinados por tentativa)

transdutor	indutor
Mt 38	$2,7 \mu\text{H}$
Mt 39	$2,2 \mu\text{H}$
Mt 41	$3,3 \mu\text{H}$
Mt 42	$2,2 \mu\text{H}$

#### IV.2.2.1.1 Mapeamento no plano XY – Comparação dos transdutores com e sem indutor

O mapeamento no plano XY foi realizado para verificar possíveis diferenças de intensidade e profundidade de campo, quando a compatibilização elétrica foi realizada. A Figura IV.19 ilustra o mapeamento no plano XY de um transdutor polarizado; (a) com e (b) sem indutor

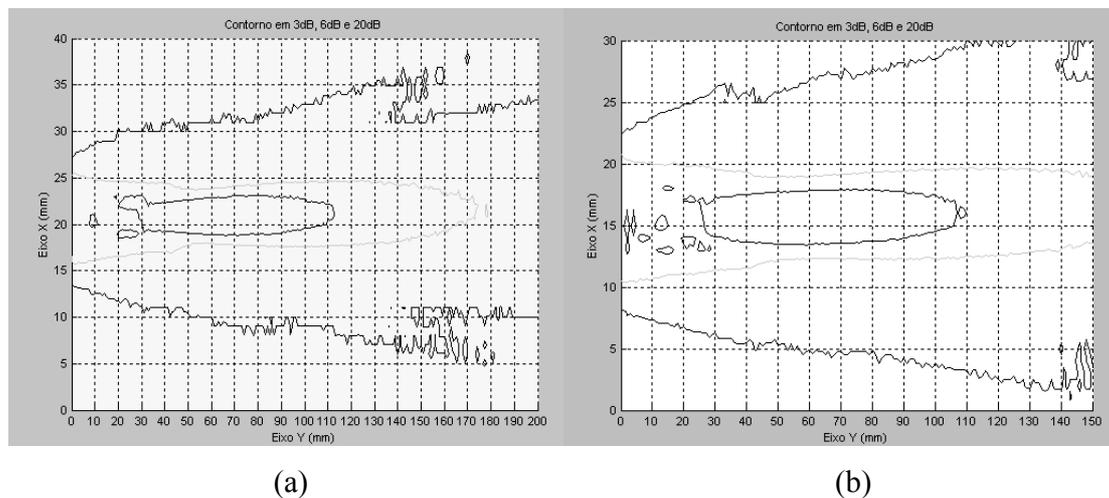


Figura IV.19 Comparação entre os mapeamentos no plano XY feitos para o transdutor Mt 38 polarizado (a) sem indutor; e (b) com indutor. As escalas da ordenada e da abscissa são diferentes nos dois mapeamentos.

#### IV.2.2.1.2 Pulso-eco – Comparação dos transdutores com e sem indutor

As comparações entre os pulsos captados pelo hidrofone e entre os ecos captados pelo transdutor, todos estes em uma posição de campo distante, foram realizadas para verificar diferenças entre o transdutor com e sem indutor. A Figura IV.20 ilustra o pulso captado pelo hidrofone de um transdutor polarizado e de um transdutor apodizado, sem e com indutor de compatibilização elétrica.

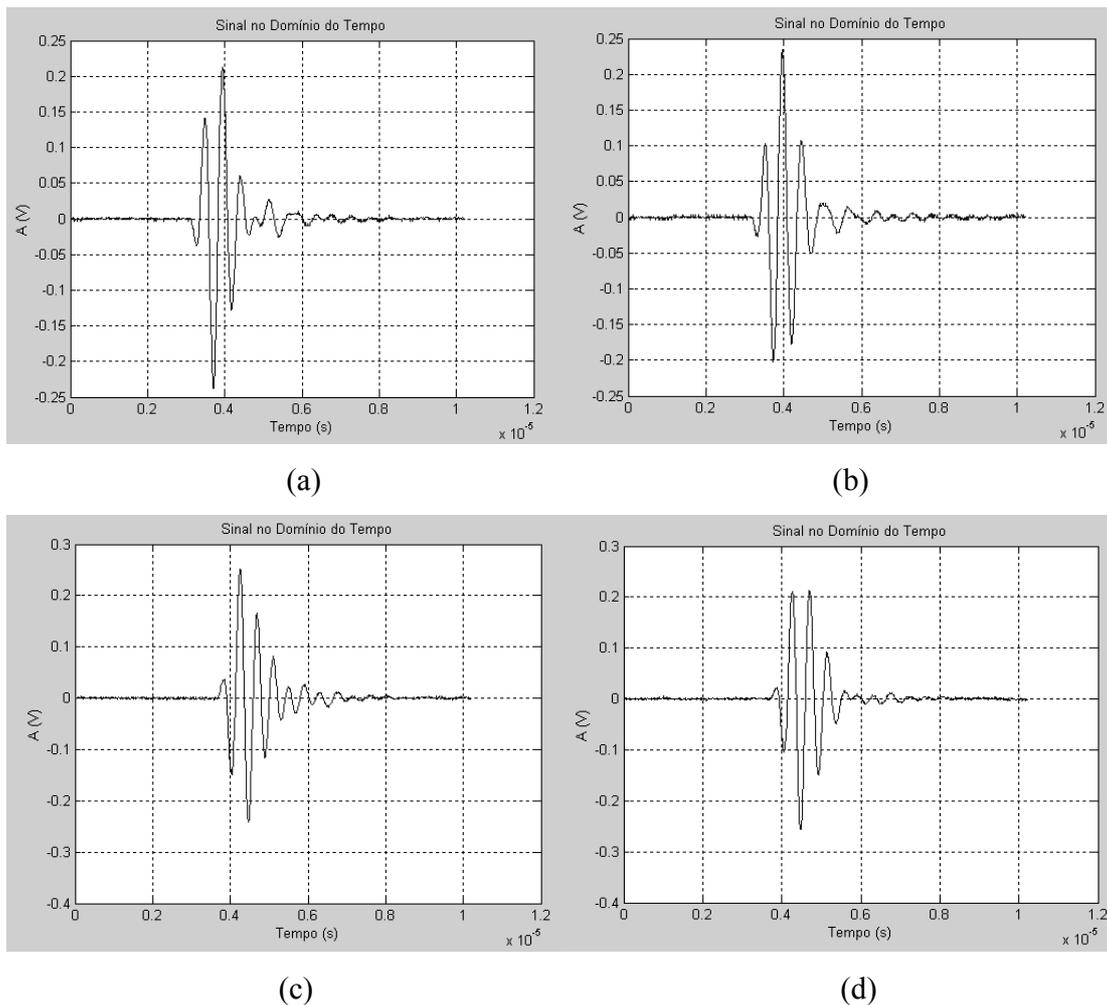
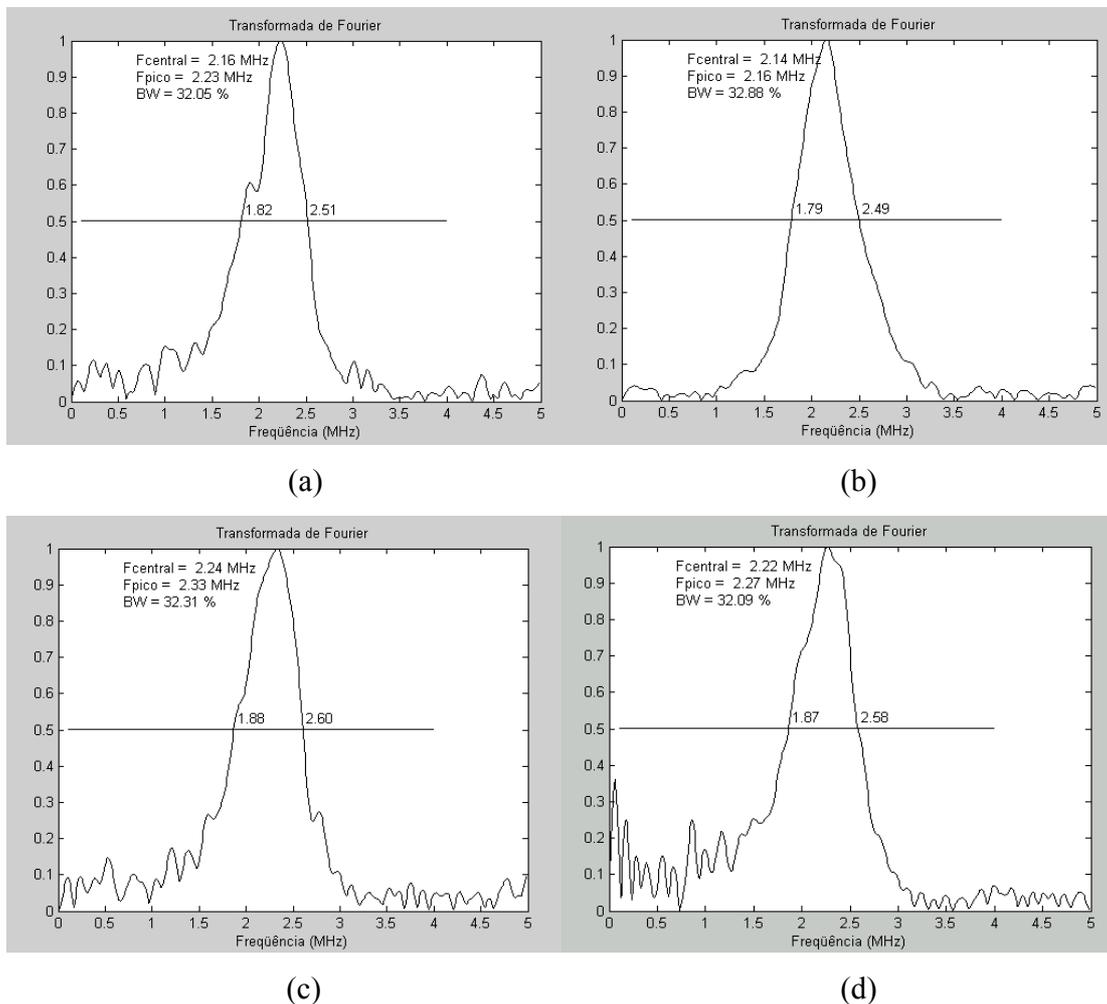


Figura IV.20 Pulsos captados pelo hidrofone e gerados pelo transdutor Mt 38 polarizado (a) sem indutor e (b) com indutor; e pelo transdutor Mt 39 apodizado (c) sem indutor e (d) com indutor.

Completando os testes realizados para verificação do efeito da compatibilização elétrica, no desempenho de transdutores polarizados e apodizados, foi calculada através do programa “LARGBANDA”, desenvolvido pelo engenheiro Joaquim Miguel Maia, a largura de banda obtida a partir do eco captado pelo transdutor após pulso acústico emitido ser refletido por um alvo de superfície plana, localizado no início da região de campo distante.

A Figura IV.21 ilustra as larguras de banda obtidas em um transdutor polarizado (a) e (b) e em um transdutor apodizado (c) e (d) sem e com indutor, respectivamente.



A Figura IV.21 Largura de banda do transdutor Mt 38 polarizado (a) sem indutor e (b) com indutor; e do transdutor Mt 39 apodizado (c) sem indutor e (d) com indutor respectivamente.

#### IV.2.2.2 Linha Y e Linhas X

O mapeamento da linha Y, do centro da face da cerâmica, ao longo do eixo axial de propagação do campo acústico, e a linha X, ao longo da direção lateral do campo, mapeadas em duas distâncias diferentes, a 50mm e a 100mm da face do transdutor, foram realizadas em substituição ao mapeamento do plano XY (que depende muito tempo para ser realizado). A partir da linha Y é possível observar o decaimento da intensidade do campo acústico, e através das linhas X, é possível observar a presença ou não de lóbulos laterais. Com a linha X também se verifica se o transdutor está alinhado corretamente: caso

não esteja, poderá ser observado um decaimento mais rápido da intensidade da linha Y e uma redução da profundidade do contorno de  $-3\text{dB}$ , ou seja, um valor medido incorreto.

A Figura IV.22 ilustra as linhas Y, obtidas em transdutores (a) e (b) polarizados e (c) e (d) apodizados, sem indutor.

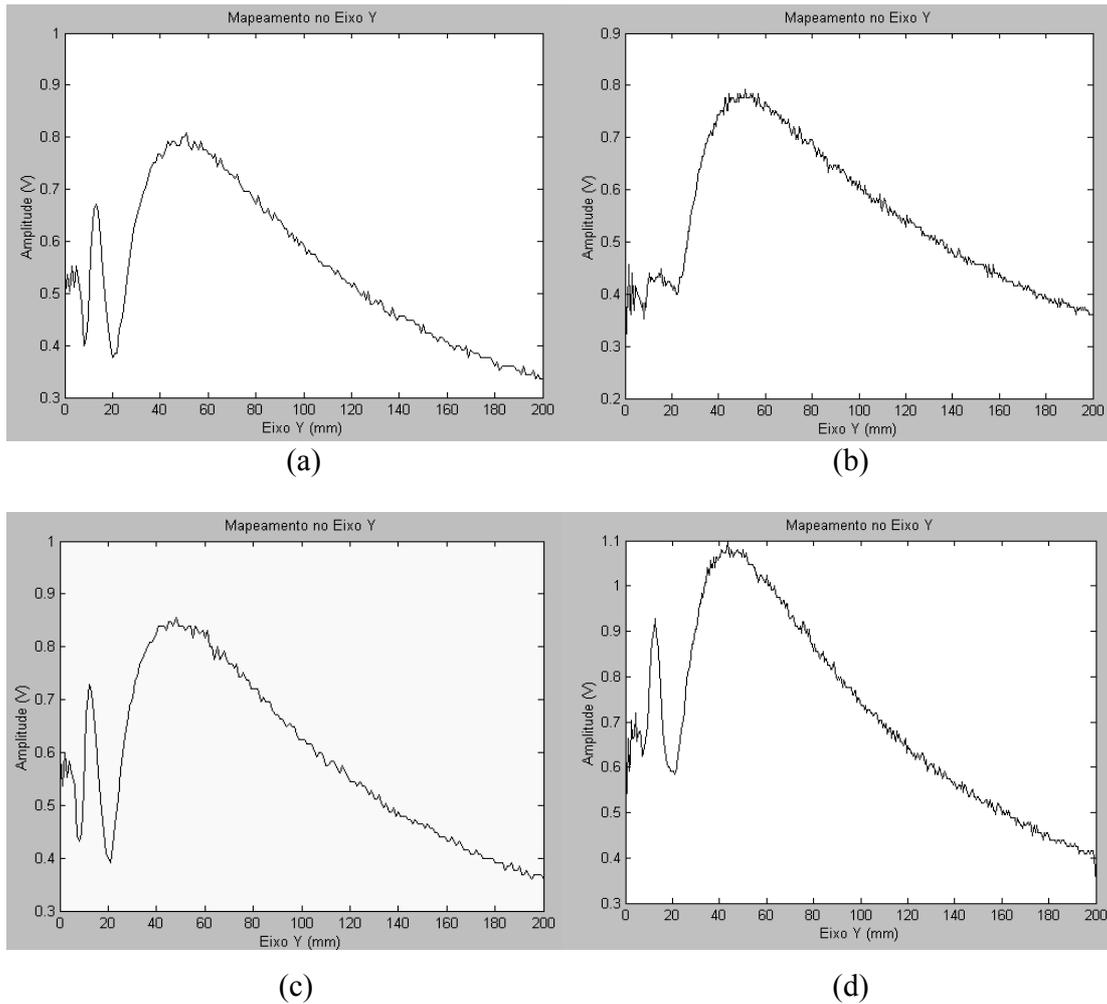


Figura IV.22 Linhas Y, obtidas com transdutores polarizados (a) Mt 38, (b) Mt 41 e apodizados (c) Mt 39 e (d) Mt 42.

As Figuras IV.23 e IV.24 ilustram, respectivamente a linha X dos transdutores polarizados e apodizados, sem indutor, obtidas a 50mm e a 100mm da face do transdutor.

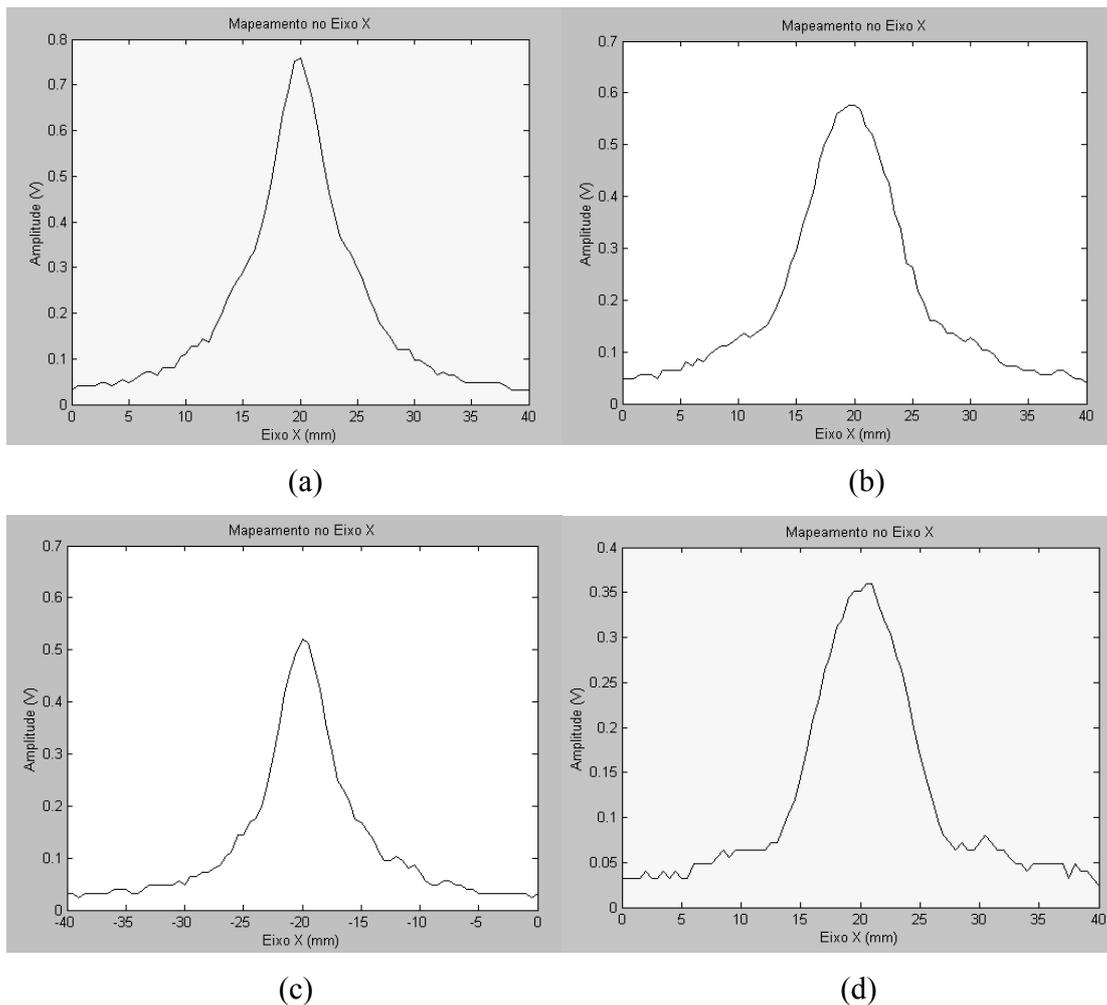


Figura IV.23 Linha X obtida com os transdutores Mt 38 polarizado (a) a 50mm e (b) a 100mm; Mt 39 apodizado (c) a 50mm e (d) a 100mm.

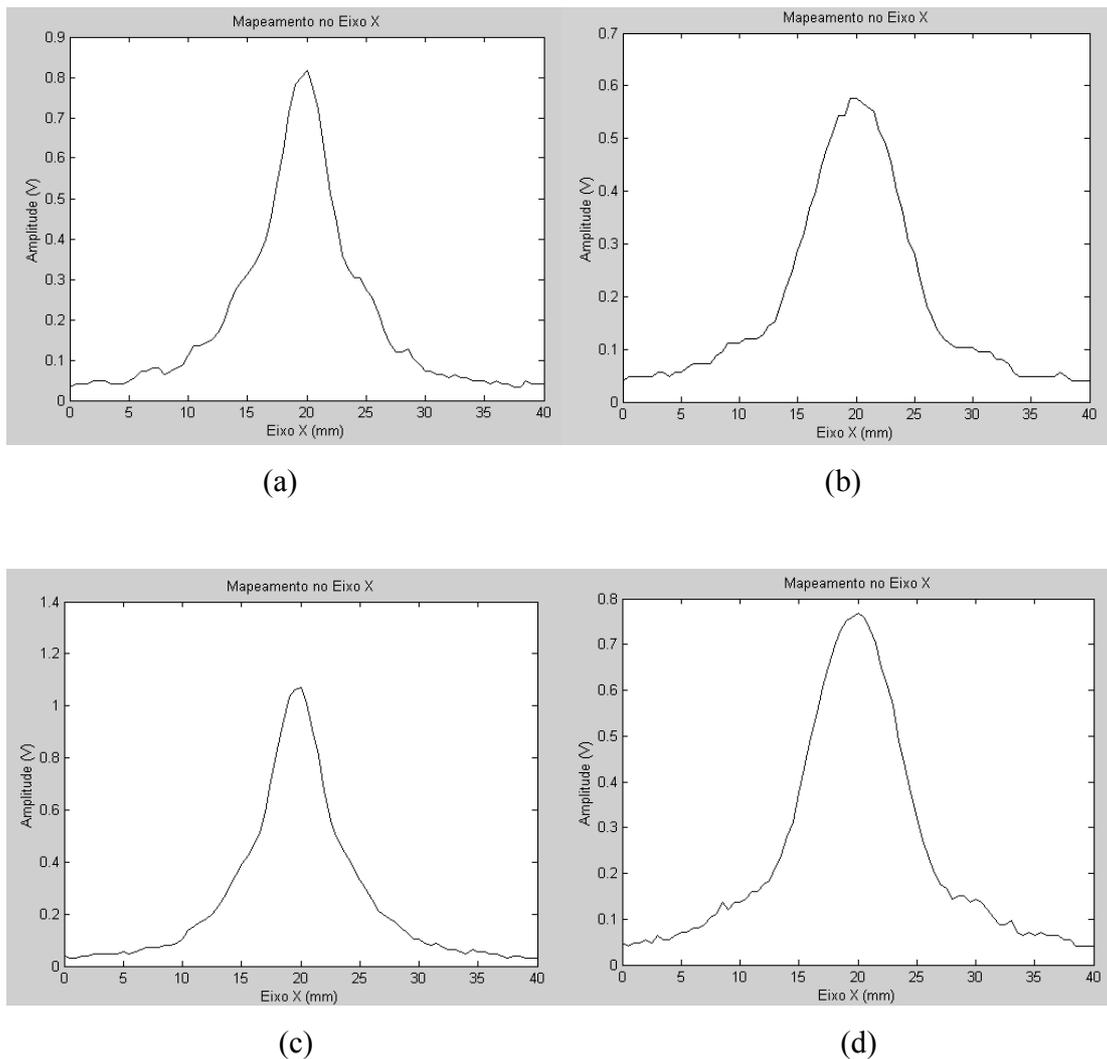
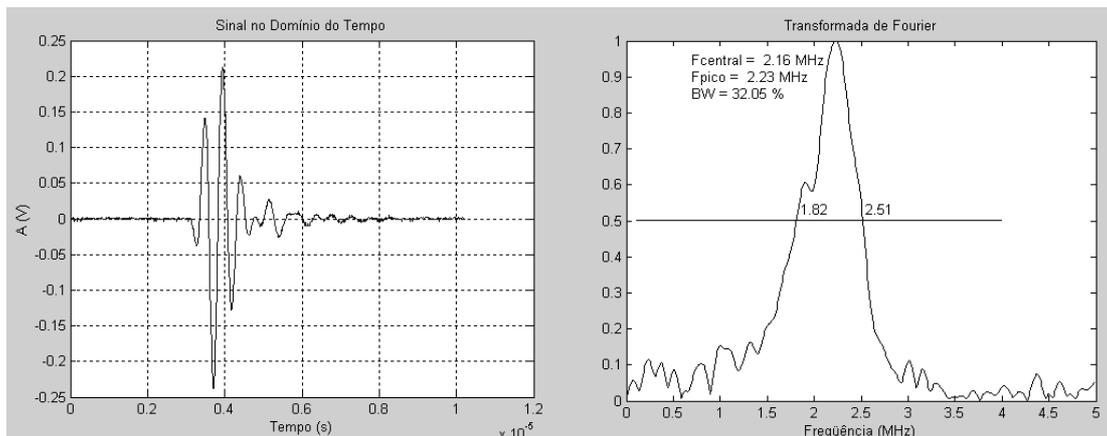


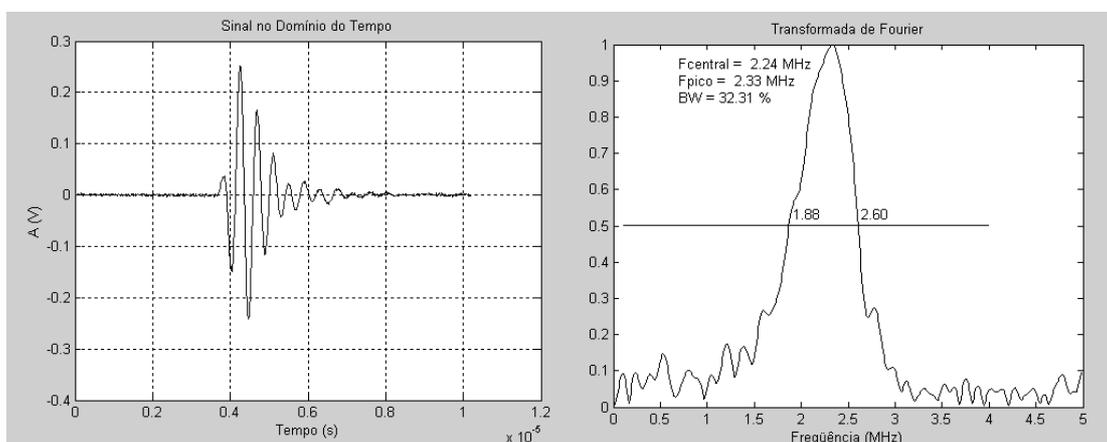
Figura IV.24 Linha X obtida com os transdutores Mt 41 polarizado (a) a 50mm e (b) a 100mm; e Mt 42 apodizado (c) a 50mm e (d) a 100mm.

### IV.2.2.3 Pulso-eco

Nos transdutores Mt 38 a 42 foi possível captar os ecos refletidos pelo alvo metálico de superfície plana posicionado no campo distante e calcular suas larguras de banda. O sinal aplicado foi de 1 pulso estreito ( $0,5\mu\text{s}$  - 2MHz) senoidal de amplitude 53 Vpp. O pulso acústico gerado e captado pelo hidrofone e o eco refletido por um alvo plano e as larguras de banda destes sinais, são mostrados nas Figuras IV.25 e IV.26, respectivamente.



(a) polarizado (b)



(c) apodizado (d)

Figura IV.25 Pulso captado pelo hidrofone em uma região de campo distante: (a) Mt 38, (c) Mt 39 e a largura de banda, do eco refletido (não mostrado) pelos transdutores: (b) Mt 38, (d) Mt 39.

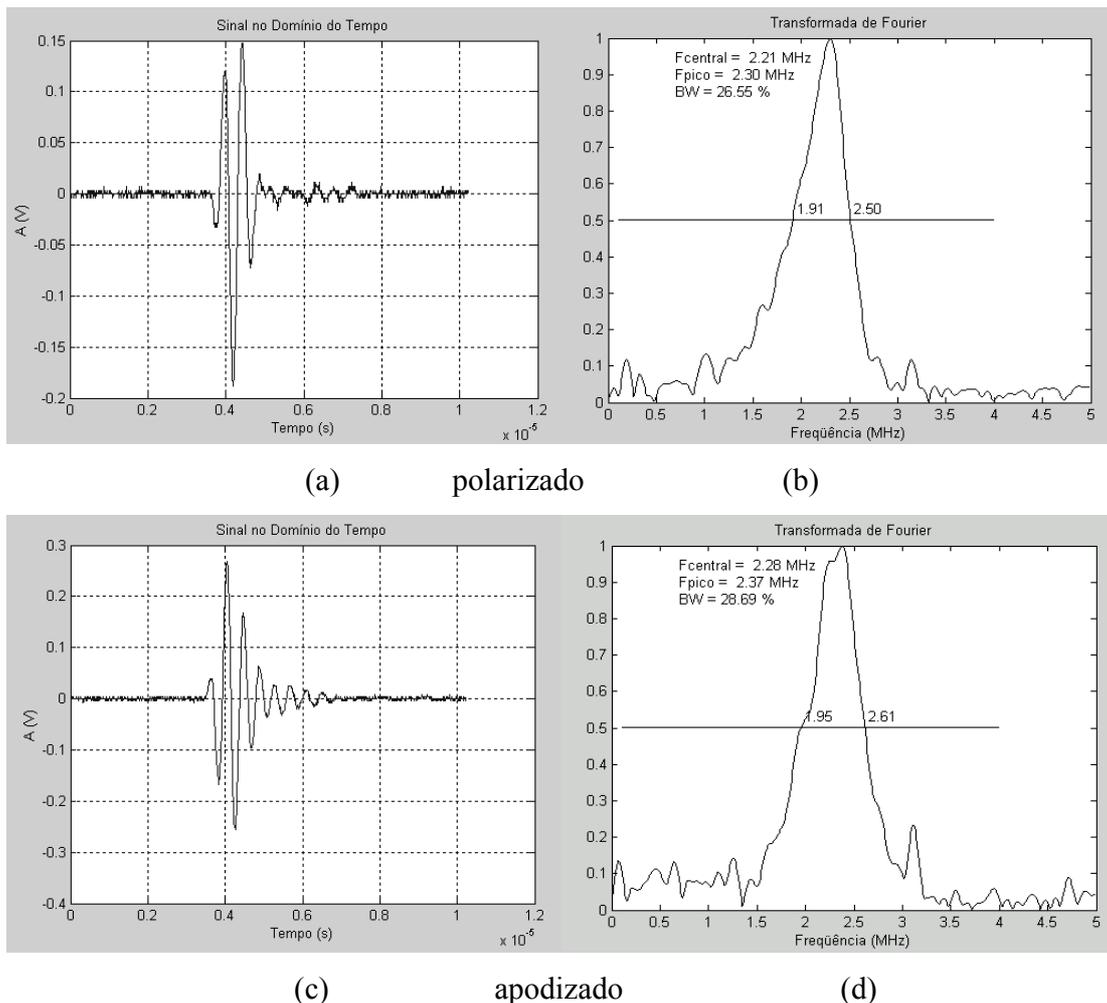


Figura IV.26 Pulso captado pelo hidrofone em uma região de campo distante: (a) Mt 41 e (c) Mt 42; e a largura de banda, do eco refletido (não mostrado) pelos transdutores: (b) Mt 41 e (d) Mt 42.

### IV.2.3 Transdutores com cerâmicas APCI

Transdutores utilizando as cerâmicas APCI, com 1mm de espessura, foram feitos com *backing* de alumina. Uma cerâmica APCI foi despolarizada e polarizada novamente a 250°C durante 5 minutos com campo aplicado de 1kV/mm. A Tabela IV.3 mostra as frequências de ressonância e anti-ressonância das cerâmicas polarizadas e seus respectivos coeficientes de acoplamento eletromecânico do modo espessura “k”. Estas cerâmicas apresentaram valores muito próximos de frequências de ressonância e de anti-ressonância e de fator de acoplamento eletromecânico.

As cerâmicas que foram utilizadas para construir transdutores, se encontram em destaque (negrito) nas tabelas apresentadas a seguir.

Tabela IV.3 Freqüências de ressonância e de anti-ressonância e fator de acoplamento eletromecânico “k” das cerâmicas APCI polarizadas de fábrica

Indentificação das cerâmicas	Freqüência de Ressonância (kHz)	Freqüência de Antiressonância (kHz)	k do modo espessura
50	2047	2301	0,4567
51	2061	2320	0,4591
52	2058	2312	0,4557
<b>53</b>	<b>2051</b>	<b>2302</b>	<b>0,4541</b>
54	2065	2322	0,4573
55	2049	2304	0,4573
56	2040,5	2293	0,4562

As freqüências de ressonância e anti-ressonância e os acoplamentos eletromecânicos k das cerâmicas APCI apodizadas se encontram na Tabela IV.4 e os mesmos valores obtidos para a cerâmica que foi despolarizada e polarizada novamente com campo aplicado de 1kV/mm (56\_1p).

Tabela IV.4 Freqüências de ressonância e de anti-ressonância e fator de acoplamento eletromecânico “k” das cerâmicas APCI apodizadas e da cerâmica 56 repolarizada a 1kV/mm.

cerâmica	f <sub>r</sub> (kHz)	f <sub>a</sub> (kHz)	k	temp°C	tempo(min)	elet (r = mm)	kV/mm
54A	2096	2362	0,4610	250	30	5	2
55A	2087	2350	0,4597	250	30	5	2
50A	2076	2271	0,4054	250	5	5	2
<b>51A</b>	<b>2091</b>	<b>2284</b>	<b>0,4023</b>	<b>250</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
52A	2080	2277	0,4069	250	5	5	2
<b>54 1A</b>	<b>2093</b>	<b>2365</b>	<b>0,4656</b>	<b>200</b>	<b>TA até 20</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
<b>55 1A</b>	<b>2100,5</b>	<b>2284</b>	<b>0,3927</b>	<b>250</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
<b>50 1A</b>	<b>2100</b>	<b>2261</b>	<b>0,3706</b>	<b>250</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
<b>52 1A</b>	<b>2079</b>	<b>2351</b>	<b>0,4669</b>	<b>160</b>	<b>TA</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
56_1p	2044	2293	0,4532	250	5	5	1

A Figura IV.27 apresenta as curvas de módulo e fase *versus* frequência de uma cerâmica APCI polarizada de fábrica e da mesma cerâmica após ter sido despolarizada e repolarizada a 250°C, com campo aplicado durante 5 minutos.

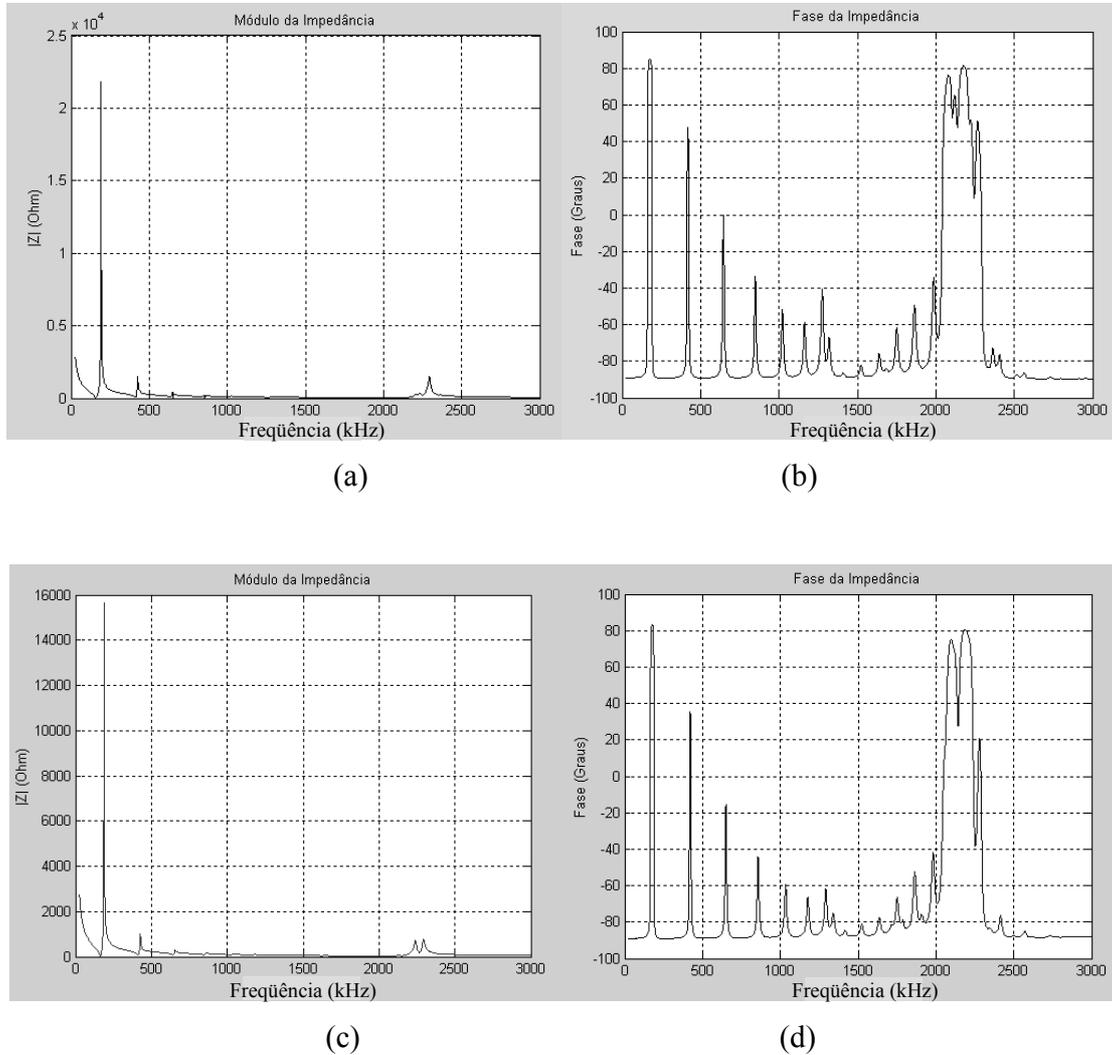


Figura IV.27 Curvas de módulo e fase da impedância versus frequência obtidas para cerâmica 56 polarizada de fábrica (a) e (b) e da mesma cerâmica polarizada com 1kV/mm de espessura da cerâmica (c) e (d).

A Tabela IV.5 (a) apresenta as frequências de ressonância e de anti-ressonância nas etapas de construção dos transdutores com cerâmica APCI e a Tabela IV.5 (b) apresenta os respectivos coeficientes de acoplamento eletromecânico “k” do modo espessura.

Tabela IV.5 (a) Frequências de ressonância e de anti-ressonância das etapas de construção dos transdutores (kHz)

cerâmicas		apodizadas					polarizadas
etapas		50_1	51	52_1	54_1	55_1	53
polarizada	f <sub>r</sub>	<b>2047</b>	<b>2061</b>	<b>2058</b>	<b>2065</b>	<b>2049</b>	<b>2051</b>
	f <sub>a</sub>	2301	2320	2312	2322	2304	2302
vibrando livre	f <sub>r</sub>	<b>2100</b>	<b>2091</b>	<b>2079</b>	<b>2093</b>	<b>2100,5</b>	<b>2051</b>
	f <sub>a</sub>	2261	2284	2351	2365	2284	2302
Sem <i>backing</i>	f <sub>r</sub>	<b>2101</b>	<b>2094</b>	<b>2078</b>	<b>2100,5</b>	<b>2099</b>	<b>2057</b>
	f <sub>a</sub>	2263,5	2287	2352	2362	2283	2303
Com <i>backing</i>	f <sub>r</sub>	<b>2048</b>	<b>2057</b>	<b>2060</b>	<b>2063</b>	<b>2050</b>	<b>2027</b>
	f <sub>a</sub>	2326,5	2360	2394	2385	2331,5	2313
Com latão	f <sub>r</sub>	<b>2047,5</b>	<b>2058</b>	<b>2059,5</b>	<b>2063,5</b>	<b>2050</b>	<b>1986</b>
	f <sub>a</sub>	2322	2359	2396	2381	2332	2295
Com PVC	f <sub>r</sub>	<b>2049</b>	<b>2055</b>	<b>2058</b>	<b>2064,5</b>	<b>2047,5</b>	<b>1984</b>
	f <sub>a</sub>	2320	2360	2396	2379	2330,5	2316
montado	f <sub>r</sub>	<b>2056,5</b>	<b>1941,5</b>	x	<b>1990</b>	<b>2005</b>	<b>1975</b>
	f <sub>a</sub>	2294,5	2178	x	2273	2266	2244

Tabela IV.5 (b) Coeficiente de acoplamento eletromecânico “k” do modo espessura medido após cada uma das etapas de construção dos transdutores

cerâmicas	polarizada	livre	s/ <i>backing</i>	c/ <i>backing</i>	c/latão	c/pvc ext	montado
<b>50_1</b>	0,4557	<b>0,3706</b>	0,3720	0,4744	0,4761	0,4690	0,4435
<b>51</b>	0,4591	<b>0,4023</b>	0,4020	0,4902	0,4887	0,4917	0,4532
<b>52_1</b>	0,4557	<b>0,4669</b>	0,4684	0,5094	0,5110	0,5121	x
<b>53</b>	0,4541	<b>0,4541</b>	0,4497	0,4816	0,5012	0,5159	0,4747
<b>54_1</b>	0,4573	<b>0,4656</b>	0,4573	0,5018	0,4989	0,4969	0,4833
<b>55_1</b>	0,4573	<b>0,3927</b>	0,3933	0,4763	0,4767	0,4776	0,4659

As Figuras IV.28 a IV.33 apresentam os gráficos de Fase da Impedância x Frequência das etapas de construção dos transdutores com cerâmica APCI (cerâmica vibrando livre, sem *backing*, com *backing* e montado). O transdutor 52\_1 apresentou problemas nas etapas finais de construção e foi descartado.

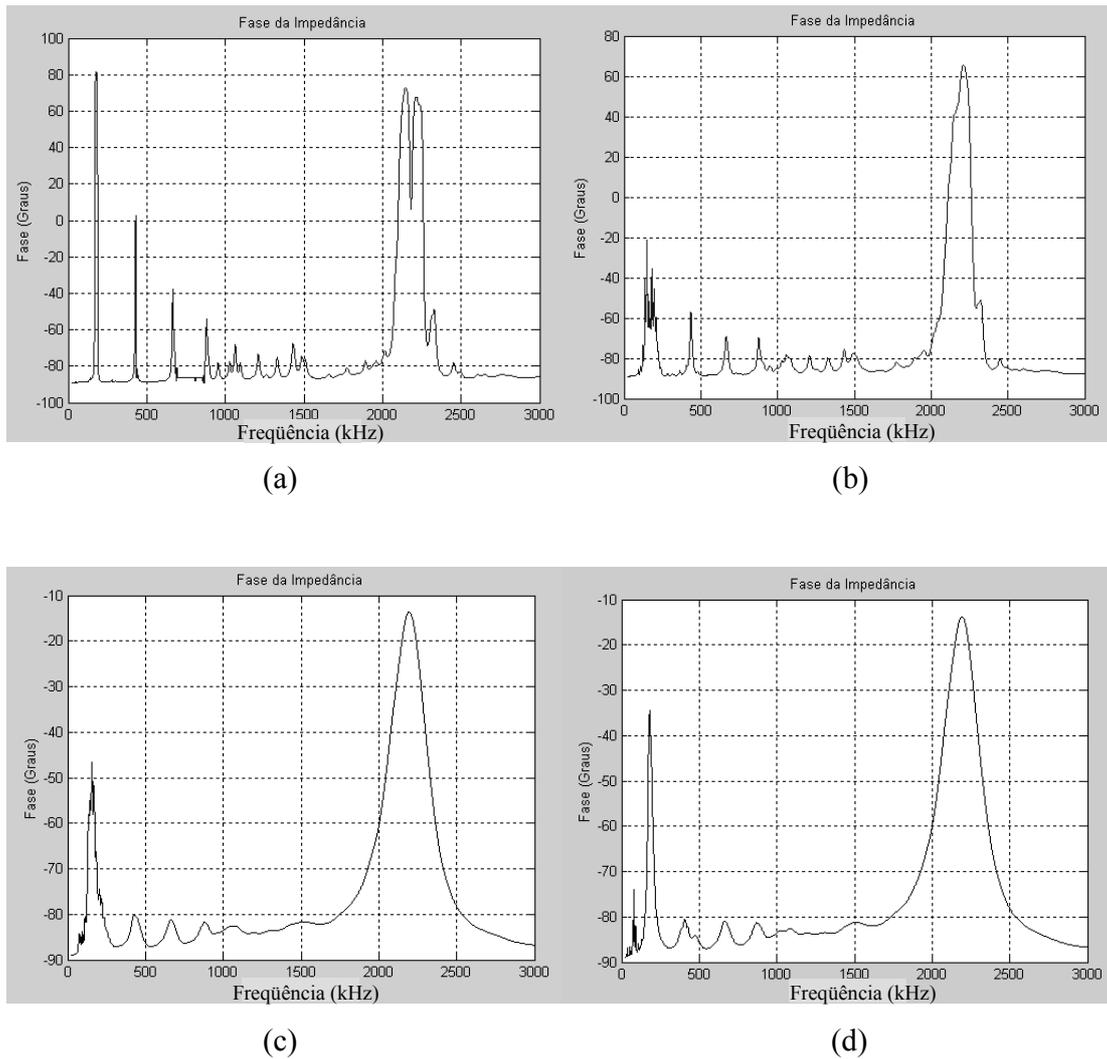


Figura IV.28 Gráficos de Fase da Impedância x Frequência obtidos após as etapas de construção do transdutor Mt 50\_1 apodizado, (a) livre, (b) sem *backing*, (c) com *backing* e (d) montado.

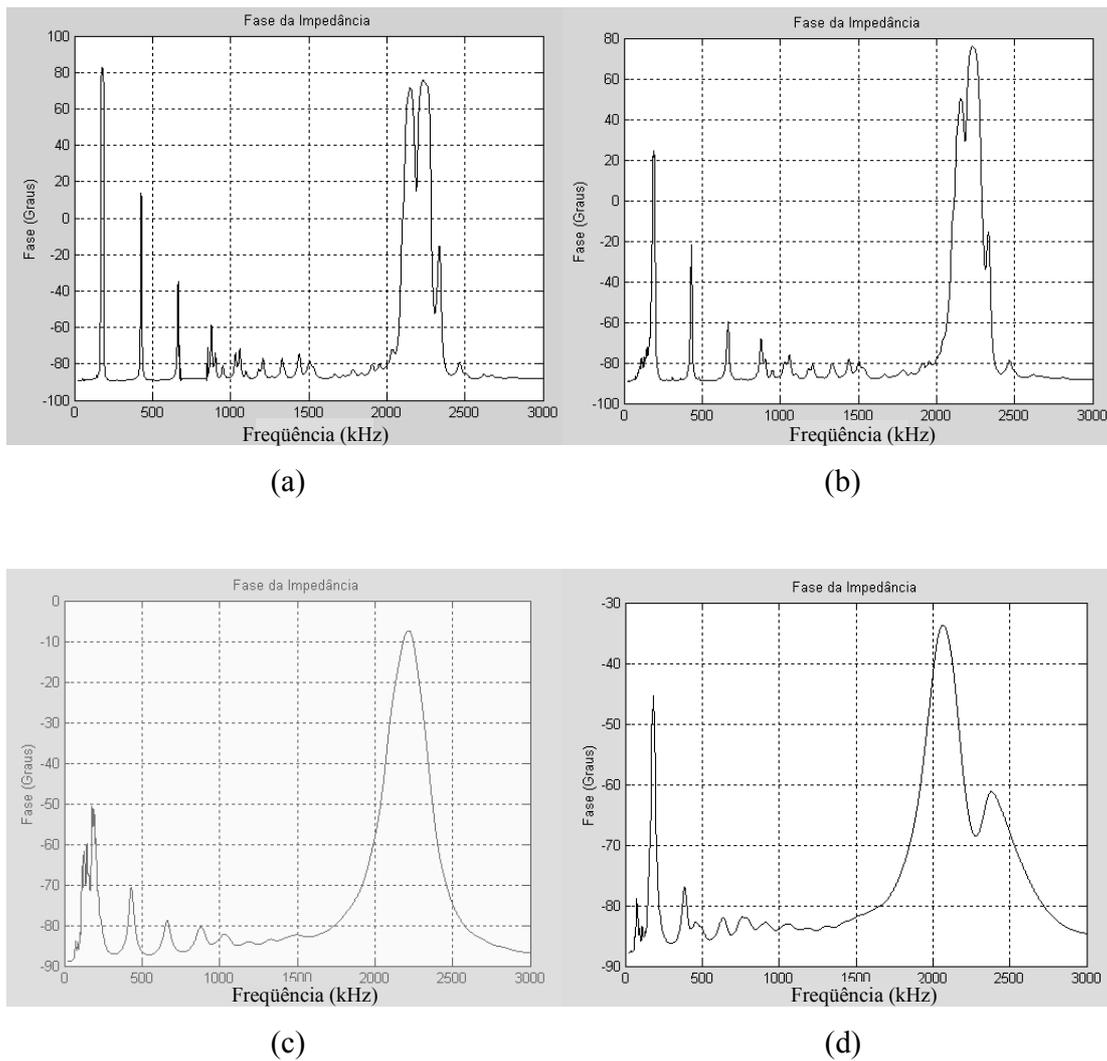


Figura IV.29 Gráficos de Fase da Impedância x Frequência obtidos após as etapas de construção do transdutor Mt 51 apodizado, (a) livre, (b) sem *backing*, (c) com *backing* e (d) montado.

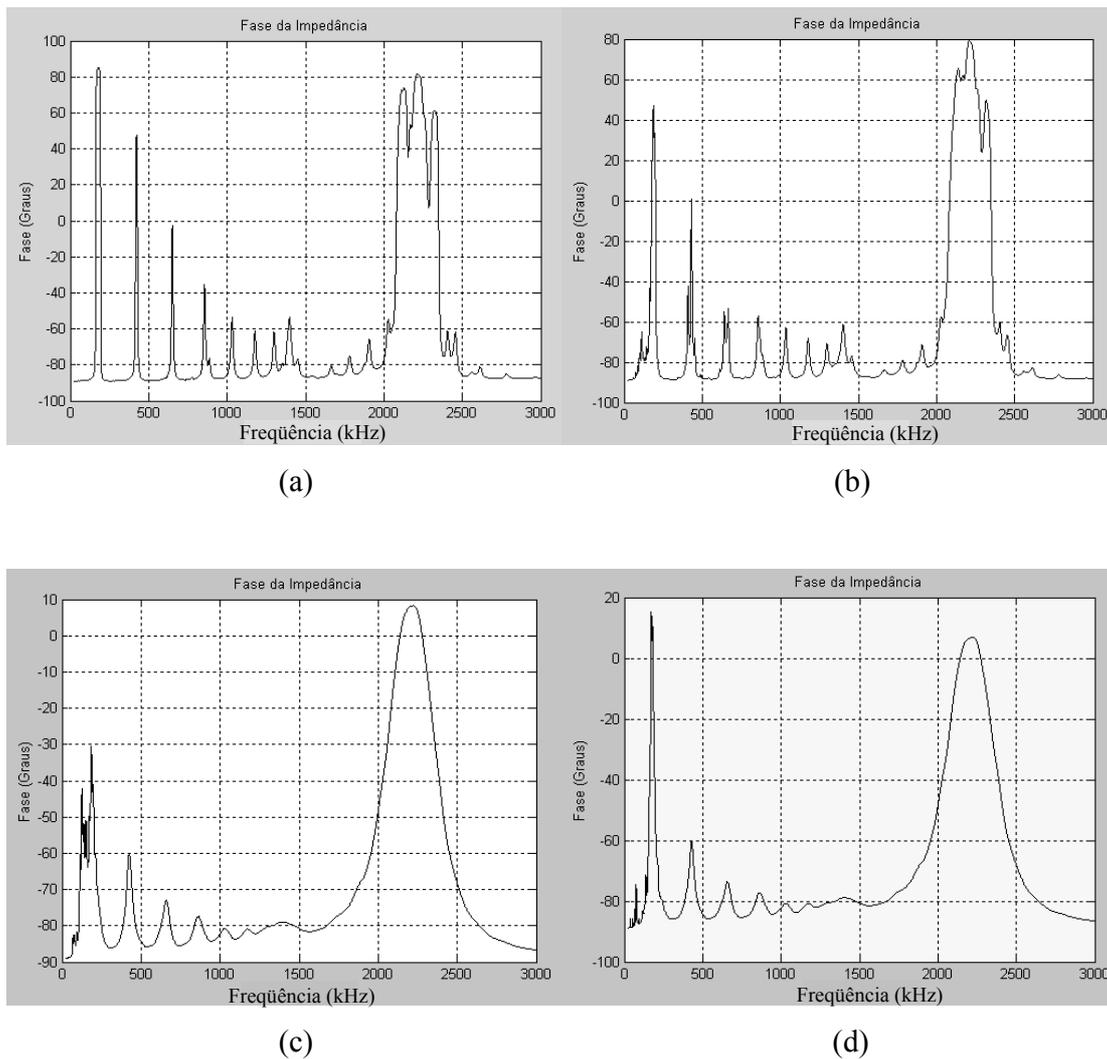


Figura IV.30 Gráficos de Fase da Impedância x Frequência obtidos após as etapas de construção do transdutor Mt 52\_1 apodizado, (a) livre, (b) sem *backing*, (c) com *backing* e (d) com latão.

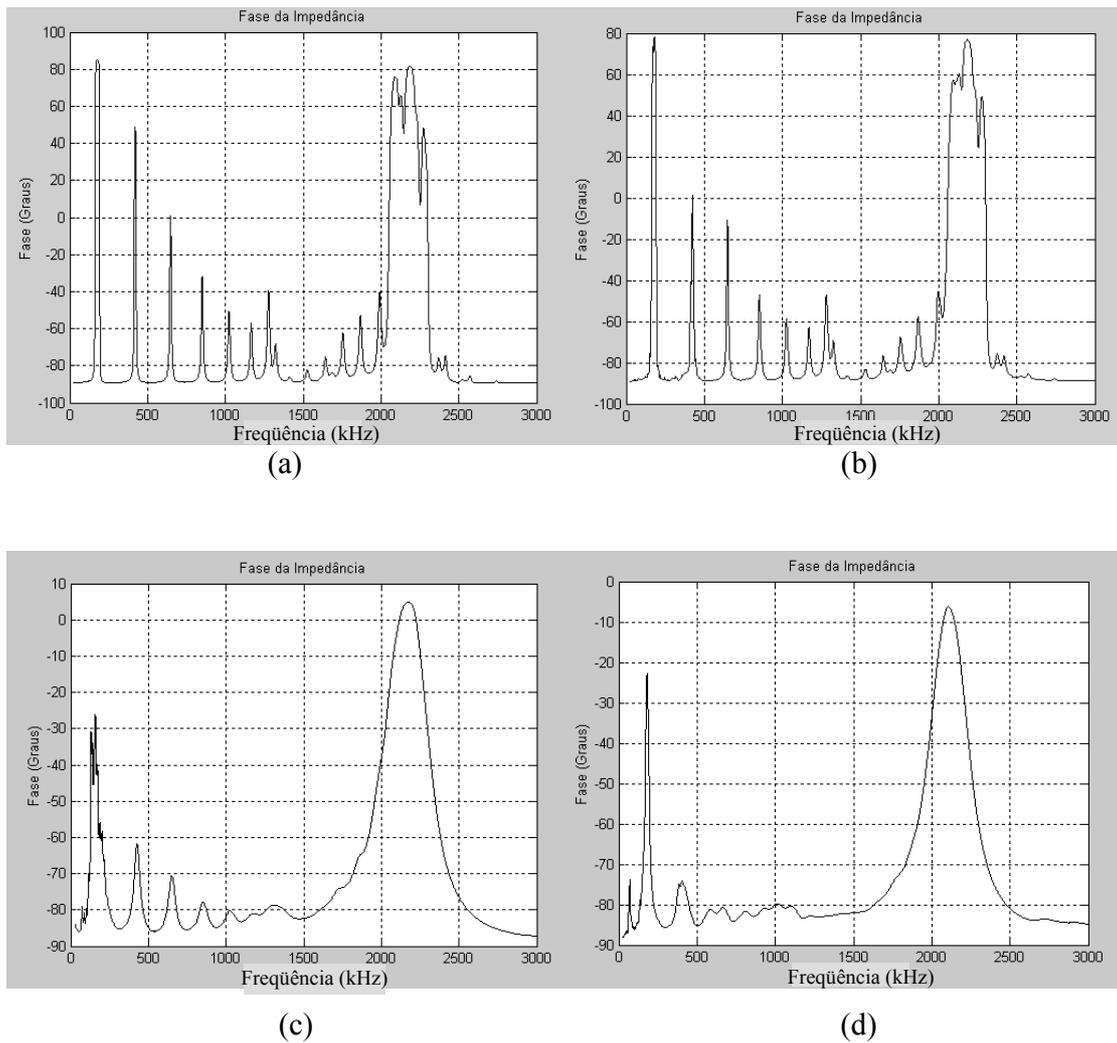


Figura IV.31 Gráficos de Fase da Impedância x Frequência obtidos após as etapas de construção do transdutor Mt 53 polarizado, (a) livre, (b) sem *backing*, (c) com *backing* e (d) montado

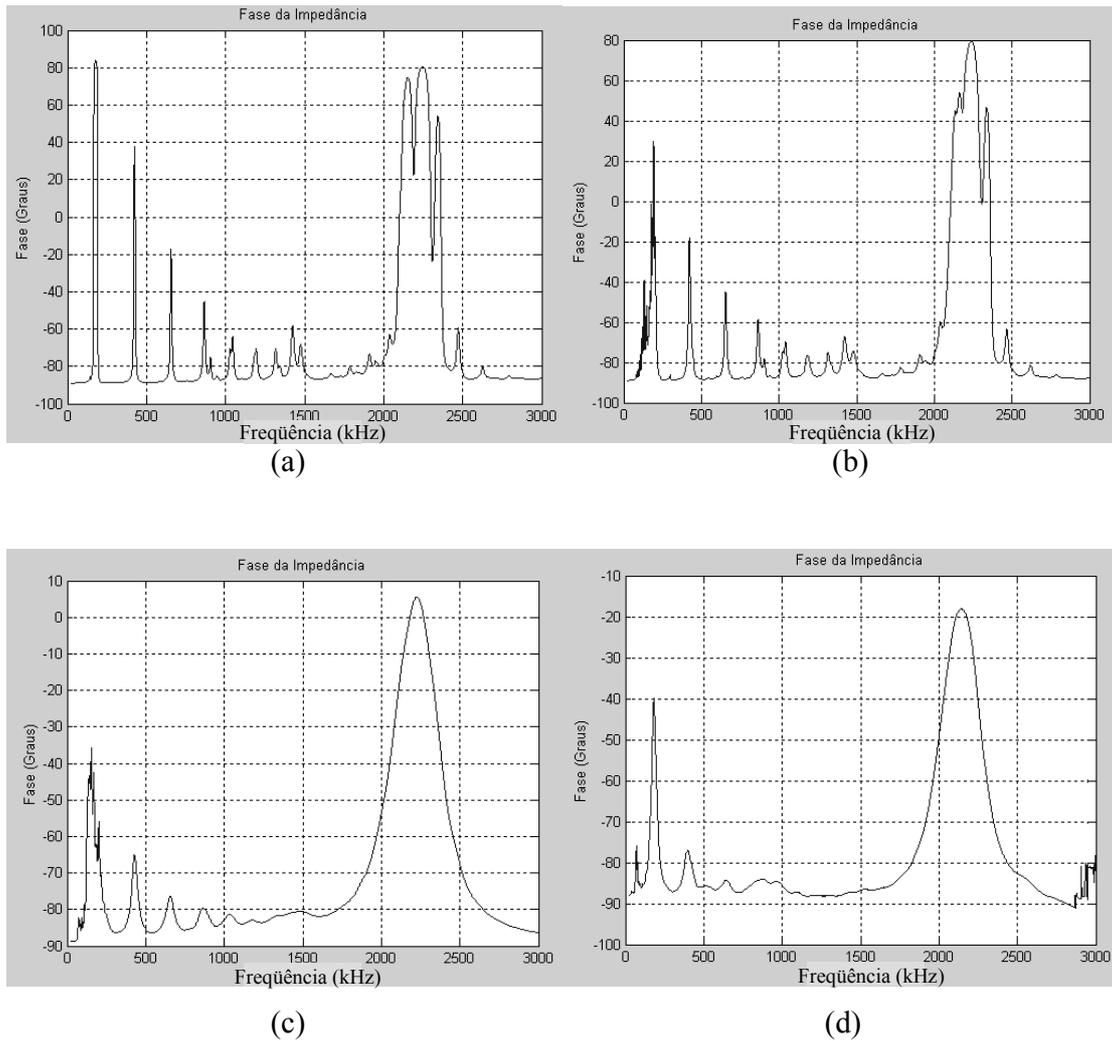


Figura IV.32 Gráficos de Fase da Impedância x Frequência obtidos após as etapas de construção do transdutor Mt 54\_1 apodizado, (a) livre, (b) sem *backing*, (c) com *backing* e (d) montado.

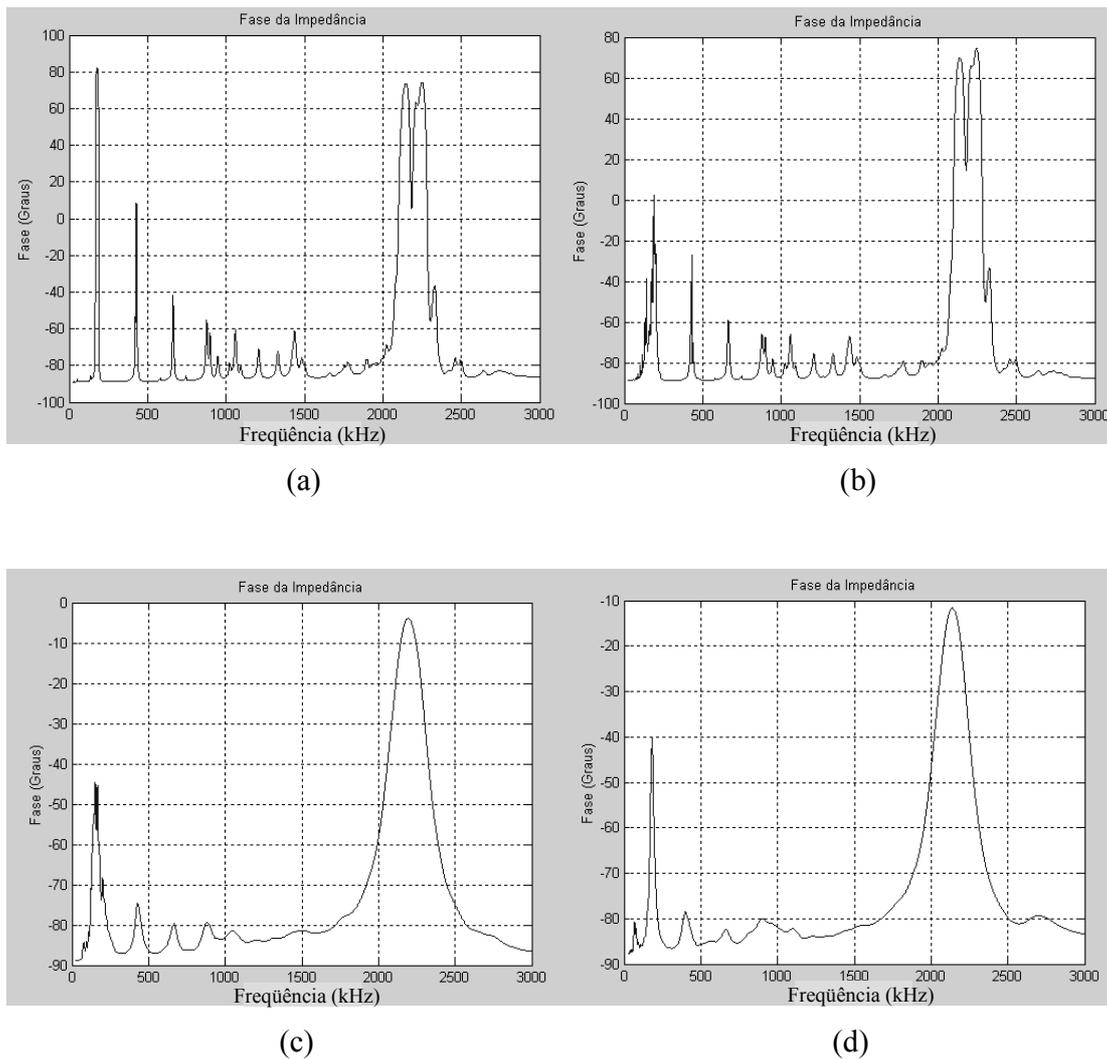


Figura IV.33 Gráficos de Fase da Impedância x Frequência obtidos após as etapas de construção do transdutor Mt 55\_1 apodizado, (a) livre, (b) sem *backing*, (c) com *backing* e (d) montado.

#### IV.2.3.1 Linha Y e Linhas X

Nos transdutores construídos com cerâmicas APCI, foi realizado o mapeamento da linha Y (200mm), a partir do centro da face da cerâmica, ao longo do eixo axial de propagação do campo acústico, e linhas X (40mm na direção lateral do campo acústico), mapeadas a 50, 100 e 150mm da face da cerâmica. As Figuras IV.34 a IV.37 mostram estes mapeamentos. Durante o mapeamento dos transdutores 50\_1 e 55\_1 o “Sistema de

Mapeamento” apresentou problemas, e os traçados das linhas X (não mostrados aqui) resultaram bastante contaminados por ruído.

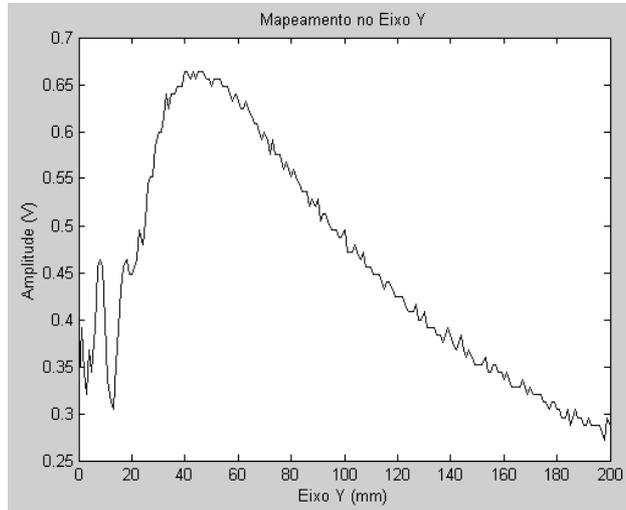


Figura IV.34 Linha Y do transdutor apodizado Mt 50\_1.

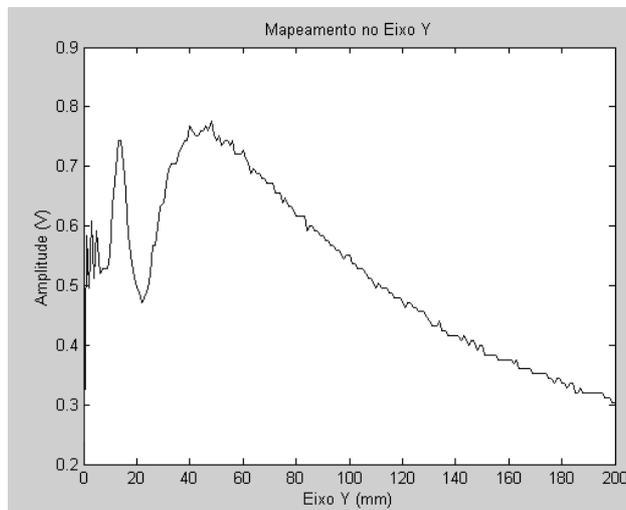
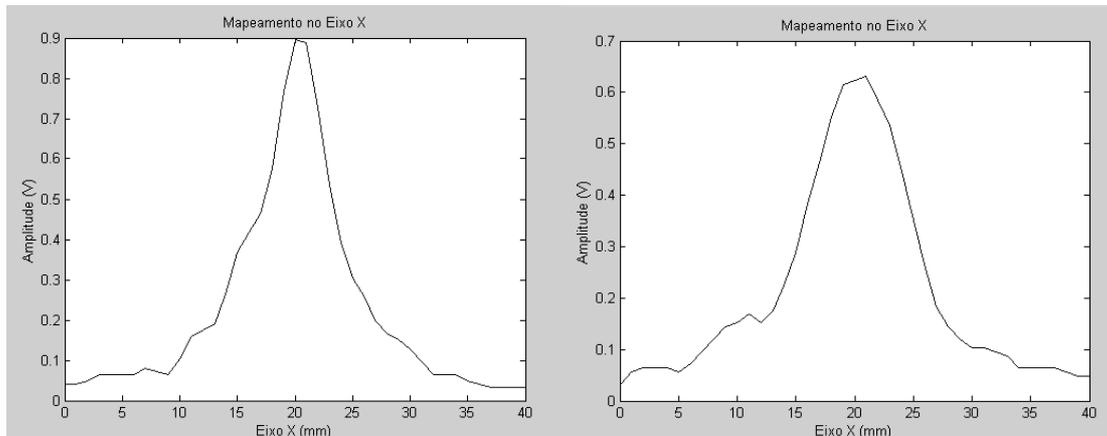
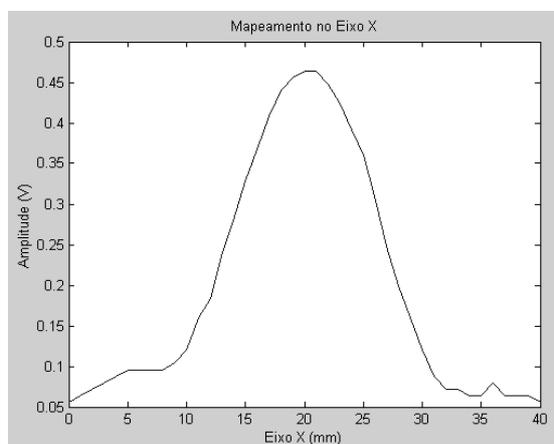


Figura IV.35 (a). Linha Y do transdutor apodizado Mt 55\_1.



(a)

(b)



(c)

Figura IV.35 (b). Linha X do transdutor apodizado Mt 51 a (a) 50mm, (b) 100mm e (c) 150mm da face do transdutor.

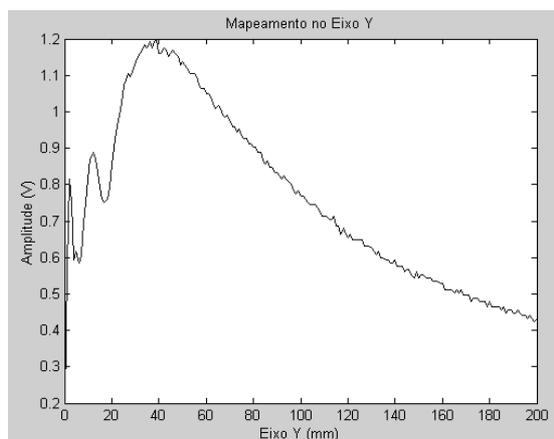
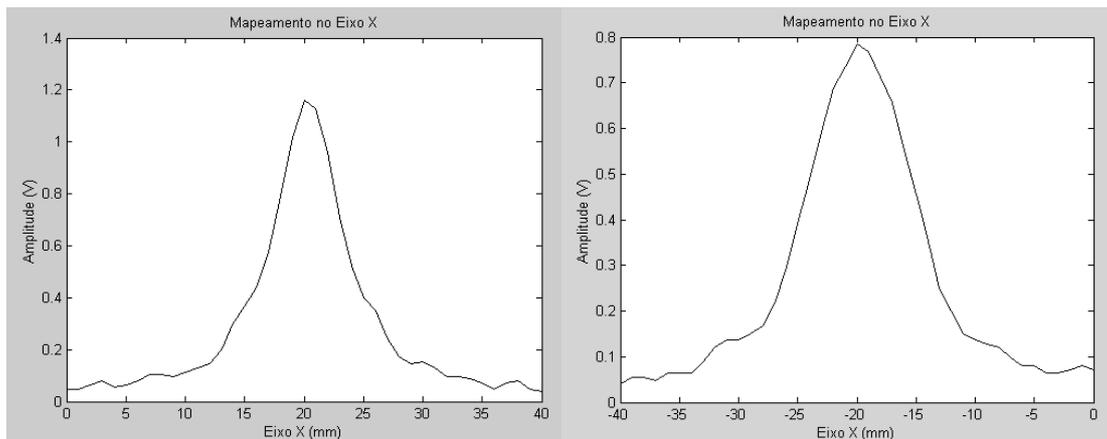
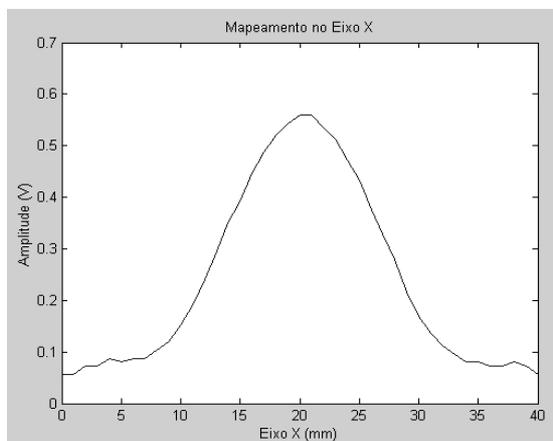


Figura IV.36 (a). Linha Y do transdutor polarizado Mt 53.



(a)

(b)



(c)

Figura IV.36 (b). Linha X do transdutor polarizado Mt 53 a (a) 50mm, (b) 100mm e (c) 150mm da face do transdutor.

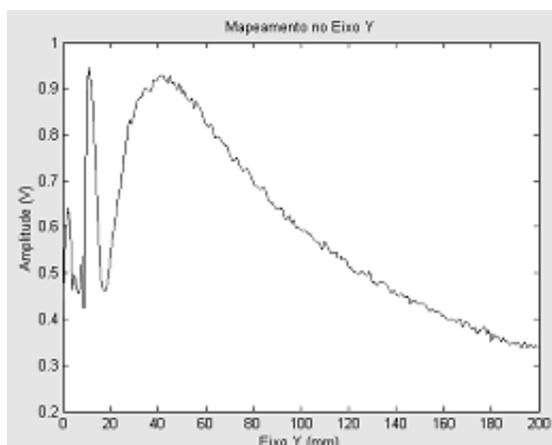


Figura IV.37 (a). Linha Y do transdutor polarizado Mt 54\_1.

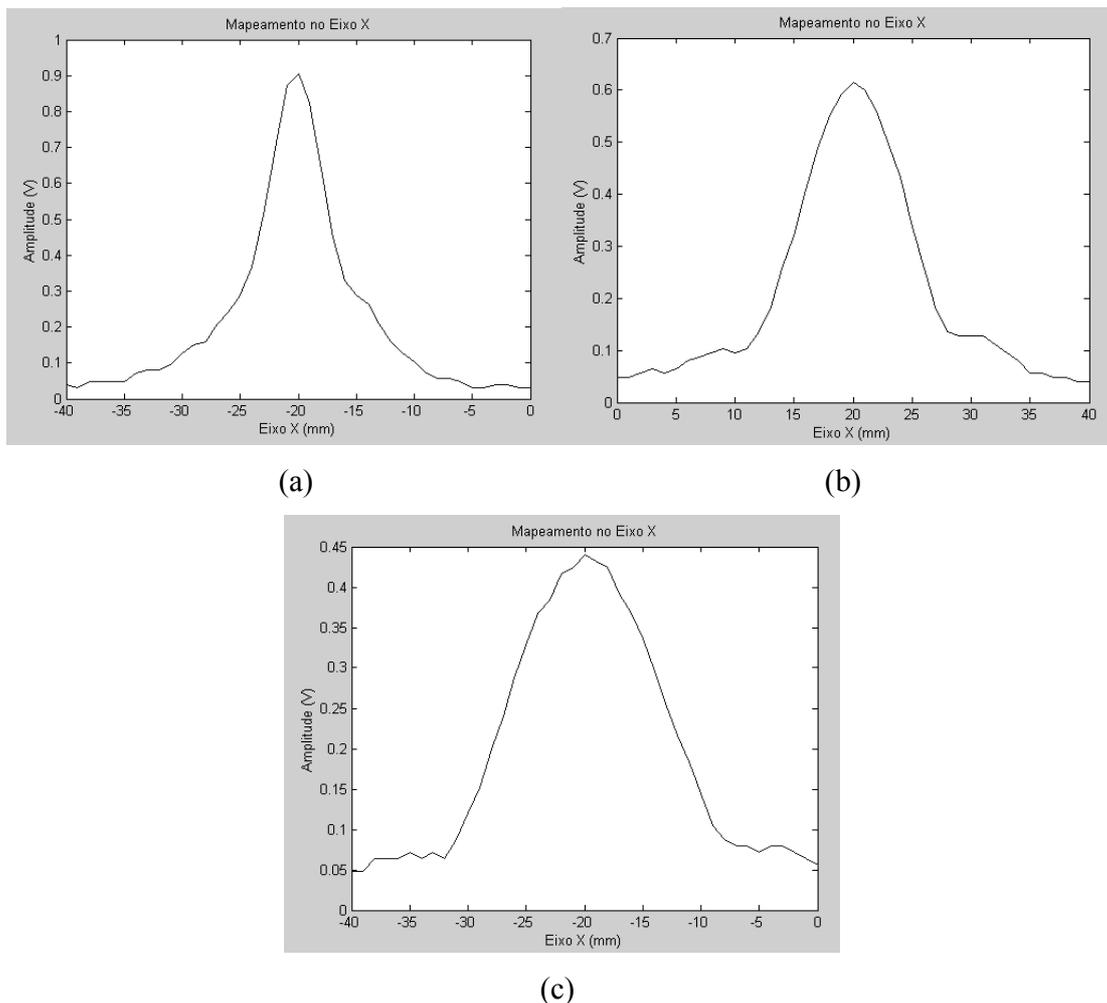
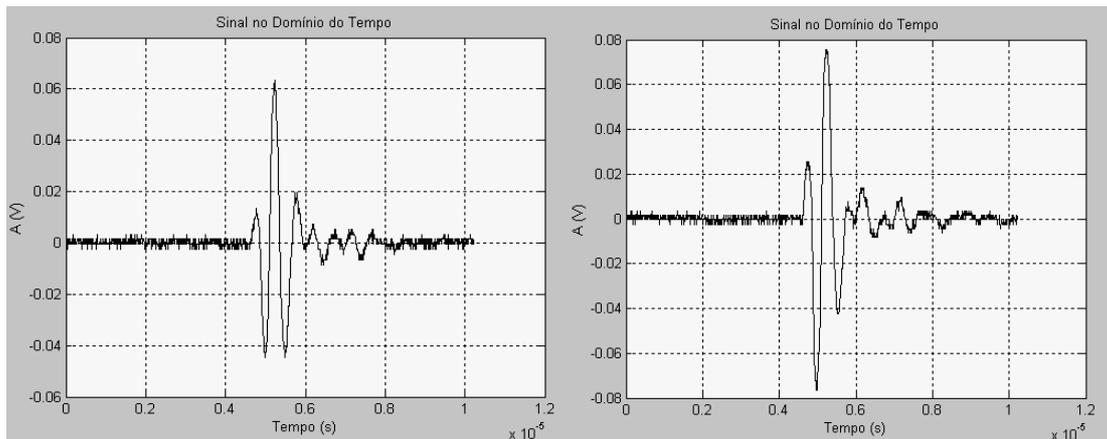


Figura IV.37 (b). Linha X do transdutor apodizado Mt 54\_1 a (a) 50mm, (b) 100mm e (c) 150mm da face do transdutor.

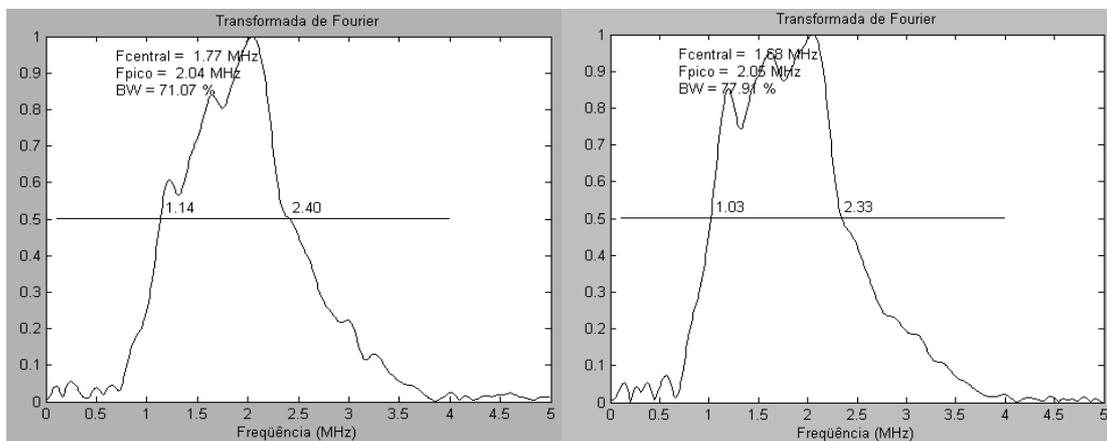
#### IV.2.3.2 Pulso-eco

Mesmo com ecos de 150mVpp, devido à presença de interferência (ruídos) intensa no Sistema de Mapeamento, durante a execução de medidas em pulso-eco, não foi possível captar ecos com qualidade para fazer o cálculo da faixa de passagem. Nas Figuras IV.38 a IV.42 são apresentados os pulsos acústicos gerados pelos transdutores ao serem excitados por pulsos estreitos senoidal e retangular negativo, e as larguras de banda destes pulsos.



(a)

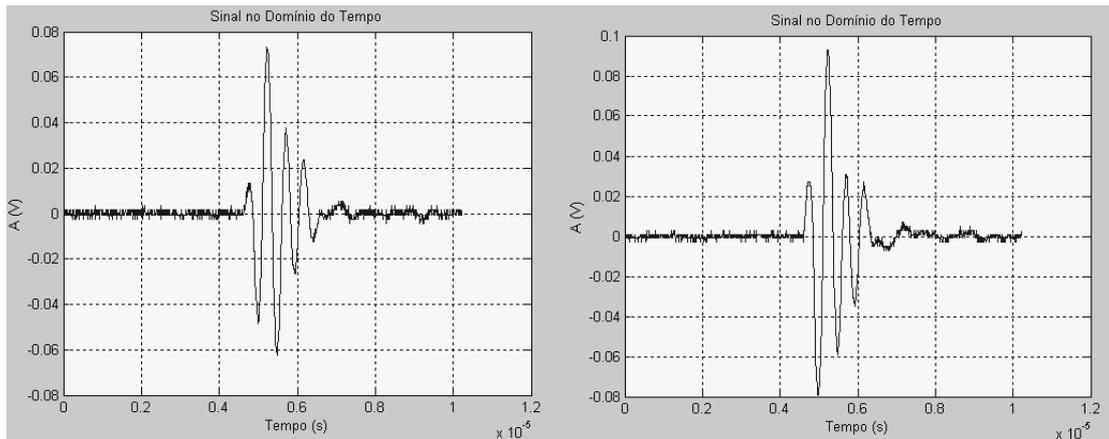
(b)



(c)

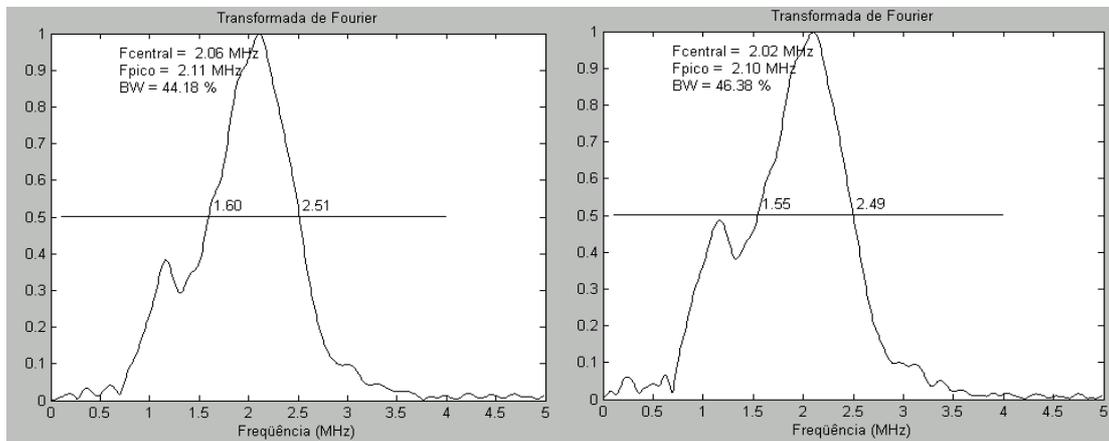
(d)

Figura IV.38 Pulso emitido pelo transdutor apodizado Mt50\_1 e captado pelo hidrofone, pulso estreito senoidal (a) e retangular negativo (b); (c) e (d), larguras de banda destes pulsos.



(a)

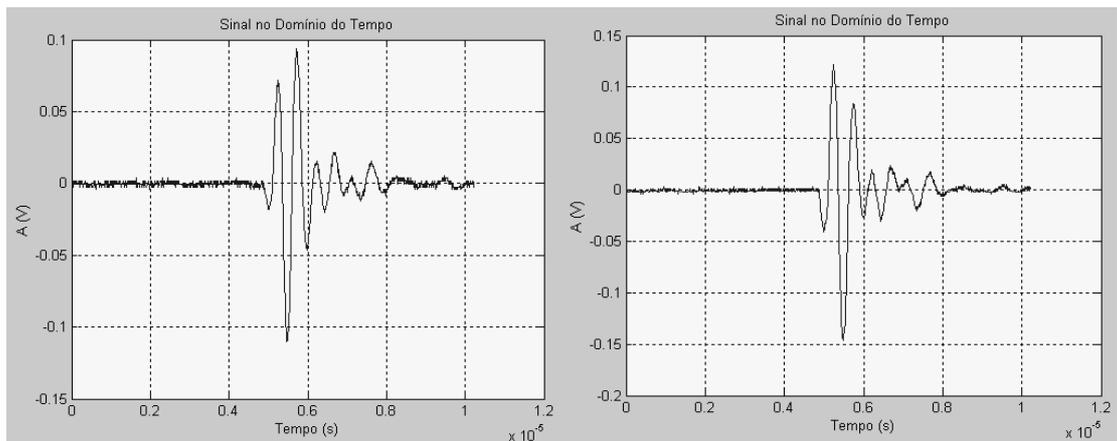
(b)



(c)

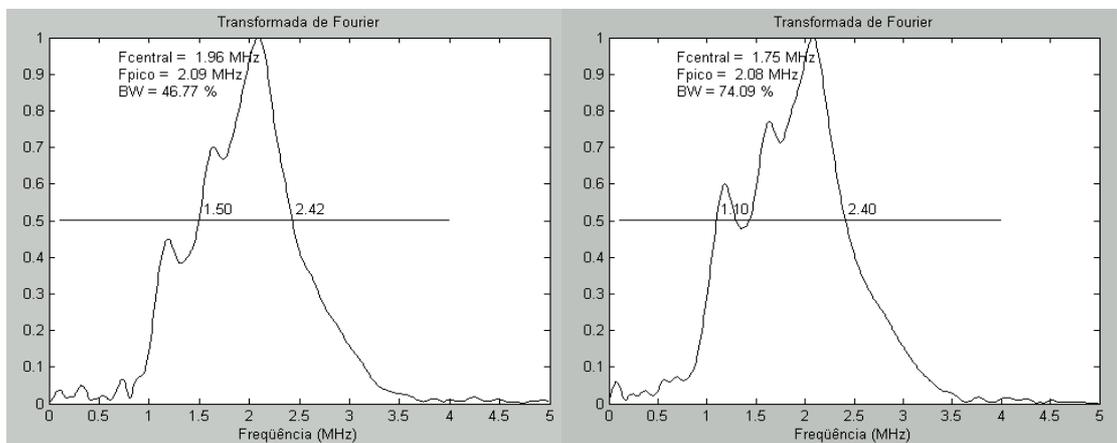
(d)

Figura IV.39 Pulso emitido pelo transdutor apodizado Mt 51 e captado pelo hidrofone, pulso estreito senoidal (a) e retangular negativo (b); (c) e (d), larguras de banda destes pulsos.



(a)

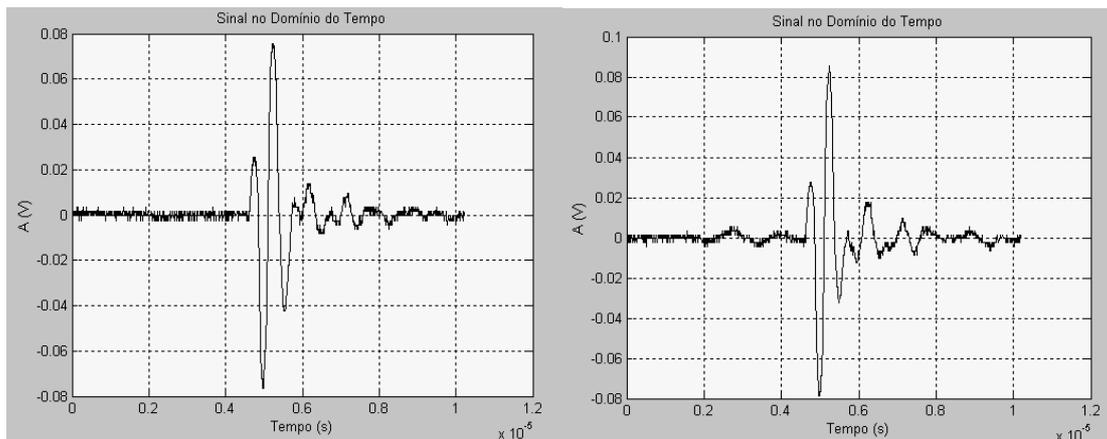
(b)



(c)

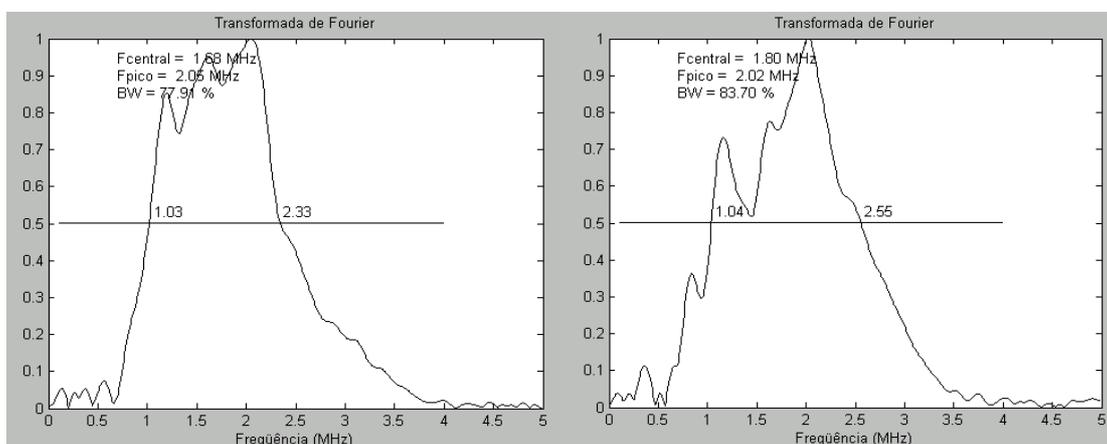
(d)

Figura IV.40 Pulso emitido pelo transdutor apodizado Mt 53 e captado pelo hidrofone, pulso estreito senoidal (a) e retangular negativo (b); (c) e (d) larguras de banda destes pulsos.



(a)

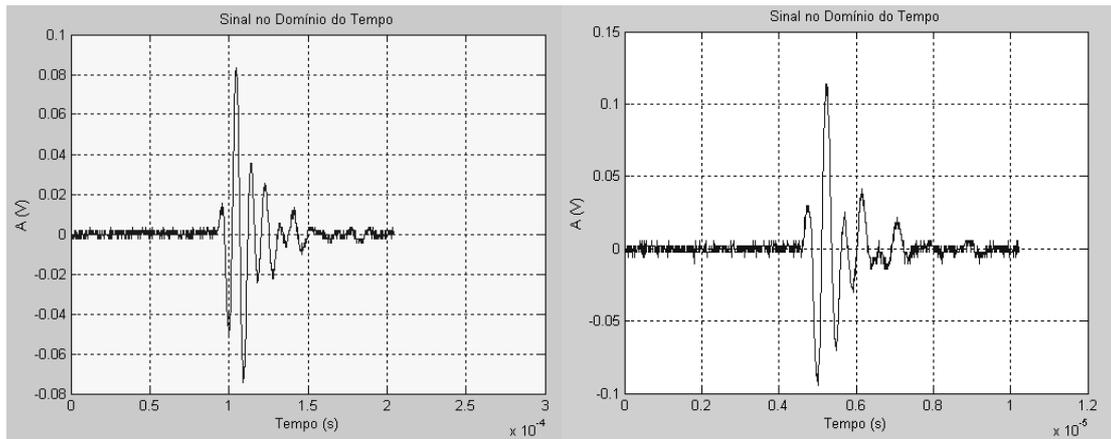
(b)



(c)

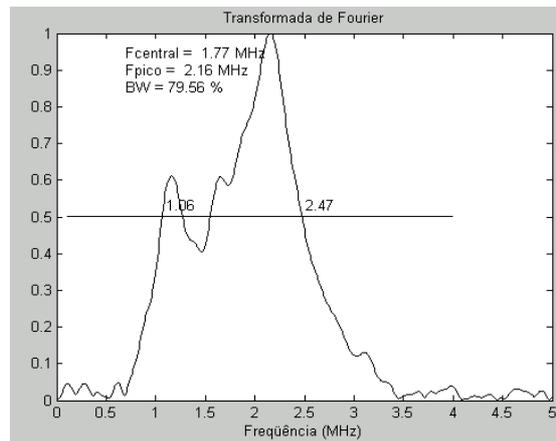
(d)

Figura IV.41 Pulso emitido pelo transdutor apodizado Mt 54\_1 e captado pelo hidrofone, pulso estreito senoidal (a) e retangular negativo (b); (c) e (d) larguras de banda destes pulsos.



(a)

(b)



(c)

Figura IV.42 Pulso emitido pelo transdutor apodizado Mt55\_1 e captado pelo hidrofone, pulso estreito senoidal (a) e retangular negativo (b); e (c) largura de banda do pulso produzido por excitação retangular negativa.

## **V. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO**

O objetivo principal do trabalho foi obter resultados que pudessem ser comparados aos alcançados por BUTTON (1998), mas através de um processo de apodização que pudesse ser realizado num tempo menor, e com o estabelecimento de uma relação definida entre a temperatura do banho de óleo isolante utilizado no processo e o tempo de aplicação do campo elétrico na cerâmica.

Muitos dos resultados apresentados não têm embasamento estatístico satisfatório, devido ao baixo número de amostras obtidas. Porém, observou-se regularidade nos resultados “ $k_t$ ” das apodizações realizadas com temperatura igual a 200°C e acima, com períodos reduzidos de aplicação do campo de apodização.

Os resultados serão discutidos seguindo a ordem em que foram realizados: apodização das cerâmicas EDO Acoustics, construção e teste dos transdutores construídos com estas cerâmicas, apodização das cerâmicas APCI, e por último, construção e testes dos transdutores construídos com as cerâmicas APCI.

### **V.1 APODIZAÇÃO DAS CERÂMICAS DA EDO ACOUSTICS**

#### **V.1.1 Repolarizações sucessivas**

Havia a necessidade de verificar se as repolarizações sucessivas poderiam causar diferenças significativas nos resultados apresentados, pelo fato de que diversas cerâmicas foram apodizadas, despolarizadas e apodizadas até três vezes. Os testes realizados (quatro repolarizações uniformes, em um disco de cerâmica) mostraram que após a terceira repolarização, a cerâmica apresentou uma redução no acoplamento eletromecânico do modo espessura (0,456). No entanto, após a quarta repolarização o acoplamento eletromecânico retornou a um valor próximo (0,485) ao da primeira repolarização (0,491) e o gráfico de Fase da Impedância x Freqüência continuou apresentando as mesmas características esperadas. As repolarizações realizadas nestes testes foram feitas com

relações de tempo *versus* temperatura, diferentes e que já haviam mostrado ser eficientes no processo de apodização.

No decorrer das apodizações, cerâmicas que estavam sendo reapodizadas pela quarta vez, também apresentaram acoplamento eletromecânico e formas de vibração iguais às aquelas obtidas após a primeira apodização.

Em vista dos resultados observados, consideramos que pelo menos até quatro repolarizações, semelhantes às utilizadas neste trabalho, não afetam as características piezoelétricas das cerâmicas utilizadas.

Apesar de estarmos trabalhando com pouco mais de 40 cerâmicas, este número não seria suficiente para a realização da quantidade de apodizações e testes que foram feitos, caso não se pudesse confiar nas repolarizações das cerâmicas. Dependendo da qualidade da cerâmica (porosidade), pode ocorrer infiltração de óleo isolante, quando esta cerâmica permanece por um longo período imersa neste óleo. Este tipo de problema não foi verificado visualmente (pelo aparecimento de manchas) com as cerâmicas utilizadas da EDO Acoustics e da APCI. No entanto, uma cerâmica que permaneceu quase seis horas imersa no óleo, sob ação do campo elétrico, apresentou um coeficiente de acoplamento muito abaixo do esperado (0,230) o que poderia estar relacionado à infiltração de óleo na cerâmica.

Outra questão a ser considerada é a avaliação dos componentes do sistema utilizado no processo de apodizações após a realização de várias apodizações. Uma falha apresentada foi o surgimento de uma camada isolante no eletrodo esférico de apodização, proveniente do óleo isolante que banha a cerâmica, como mencionado no capítulo III, que acarretou na modificação da distribuição das linhas de campo elétrico através da cerâmica. Na outra polaridade, onde a cerâmica utilizada possui um eletrodo em toda sua superfície, este problema não se destaca, pois se apenas uma parte do eletrodo do sistema não estiver isolada, haverá uma distribuição por toda a superfície da cerâmica através do eletrodo da mesma. Lembrando que na polaridade onde se encontra o eletrodo esférico, o eletrodo da

cerâmica foi retirado. Este problema, quando não constatado, pode levar a alterações nos processos de apodização (redução do coeficiente de acoplamento eletro-mecânico) não condizentes com a realidade.

### **V.1.2 Repetição do processo de apodização que era usado no LUS**

Com o objetivo de repetir os resultados obtidos por BUTTON (1998), cujo processo de apodização foi comprovado ser eficiente na redução da difração acústica, foram realizadas duas apodizações com os mesmos parâmetros de tempo e temperatura (campo aplicado a 160°C e mantido até o óleo esfriar a temperatura ambiente), que resultaram em coeficientes de acoplamento eletromecânico idênticos até a terceira casa decimal: 0,4653 e 0,4655 e apresentaram também curvas de Fase da Impedância x Freqüência com redução nas freqüências dos modos intermediários de vibração, similares aos de BUTTON (1998). Lembrando que a diferença apresentada entre as cerâmicas polarizadas e apodizadas de BUTTON (1998) era, na curva de Fase da Impedância x Freqüência, a redução dos modos intermediários de vibração (entre o radial e o espessura) nas cerâmicas apodizadas em relação às polarizadas.

### **V.1.3 Utilização de temperaturas abaixo de 160°C no processo de apodização**

Alguns testes foram realizados apenas para confirmar que temperaturas abaixo de 160°C na apodização das cerâmicas, utilizando campo de 2kV/mm, não seriam eficientes para apodizar cerâmicas, e por apresentarem o resultado esperado, foram realizados apenas com uma amostra. As apodizações que utilizaram temperatura inicial do banho de óleo isolante abaixo de 160°C (120°C e 140°C) apresentaram  $k_t$  inferior a 0,20, indicando que as cerâmicas não foram bem apodizadas.

Como apresentado na Figura IV.3, apenas as apodizações realizadas com temperatura inicial igual ou acima de 160°C, apresentaram acoplamento eletromecânico satisfatório para o modo espessura.

Com a temperatura de 160°C só foram obtidas apodizações, com coeficiente de acoplamento ( $k_t$ ) satisfatórios, quando o campo elétrico permaneceu aplicado desde o instante em que a temperatura atingiu o valor de 160°C e enquanto a temperatura do óleo, e da cerâmica, resfriava até à temperatura ambiente, como mostram os resultados da Figura IV.5 (a) .

#### **V.1.4. Utilização de temperaturas acima de 160°C no processo de apodização.**

As apodizações realizadas com temperatura acima de 160°C (200°C, 220°C e 250°C), resultaram em valores de  $k_t$  satisfatórios, mesmo com redução do tempo, nas condições que serão descritas posteriormente neste mesmo capítulo.

#### **V.1.5 Aplicação do campo elétrico de apodização desde o início do aquecimento do óleo**

##### **a) apodizações com aplicação do campo desde TA e por mais um período determinado de tempo (de 20 até 120 minutos).**

Com as temperaturas máximas, de aquecimento do óleo isolante, iguais a 160°C e 200°C, aplicando o campo desde TA e por mais um período de tempo (entre 20 e 120 minutos) após o óleo que banha a cerâmica atingir a temperatura desejada, obteve-se um acoplamento eletromecânico maior, e a mesma redução dos modos de vibração intermediários das curvas de Fase da Impedância x Freqüência, do que quando o campo era aplicado apenas após a temperatura de aquecimento do óleo ser atingida. Estes resultados indicaram que ocorre uma maior facilidade de alinhamento dos dipolos ferroelétricos quando o campo é aplicado ainda durante o aquecimento do óleo isolante.

Para temperatura de 250°C, aplicar o campo elétrico antes do óleo atingir os 250°C desejado ou aplicar apenas quando a temperatura alcançar 250°C mostrou não influenciar o resultado obtido, apesar do baixo número de amostras, os resultados se apresentaram quase idênticos, Figura IV.9. A 250°C, os dipolos elétricos devem alcançar um grau de

relaxamento muito elevado, o que faz com que estes dipolos se direcionem com facilidade com o campo aplicado independente de qualquer orientação dos dipolos, anteriormente obtida.

### **b) apodizações com aplicação do campo desde TA até TA**

A etapa de aplicação do campo elétrico desde a temperatura ambiente mostrou eficiência (aumento de  $k_t$ ) principalmente em apodizações de curta duração, que são as citadas acima (mais 20 até 120 minutos após atingir a temperatura desejada), para as temperaturas 160°C e 200°C. Em aplicações de campo elétrico de TA até TA não foi observado o mesmo resultado. Os valores de “ $k_t$ ” obtidos variaram muito, mas indicaram uma diminuição em relação aos valores obtidos com apodizações em que o campo foi aplicado só depois da temperatura de aquecimento do óleo ser atingida.

No entanto, a redução do “ $k_t$ ”, causada pelo excesso de tempo de aplicação do campo elétrico, poderia indicar um resultado satisfatório e benéfico: (de acordo com o resultado do item a), como os dipolos são mais facilmente alinhados com o campo elétrico aplicado desde TA, por estes já se alinharem com o campo, conforme alcançam o estado de relaxamento, o tempo necessário para alinhar a maior parte dos dipolos seria reduzido; como o campo elétrico permaneceu aplicado, podemos estar também diminuindo ainda mais os efeitos das ondas de borda, alinhando um maior número de dipolos com o campo de apodização, e obtendo uma apodização mais eficiente. Era esperado que as cerâmicas apodizadas apresentassem um “ $k_t$ ” menor que as cerâmicas polarizadas uniformemente. Consideramos satisfatórias, dentre as apodizações realizadas, apenas as que resultaram em acoplamentos maiores que 0,37, pelo fato de que nos experimentos realizados por BUTTON (1998), os acoplamentos das cerâmicas utilizadas para construir transdutores possuíam acoplamento eletromecânico acima de 0,4 e as curvas de Fase da Impedância x Freqüência indicavam uma redução dos modos intermediários de vibração, o que pode ter nos levado a desprezar cerâmicas bem apodizadas, mas com “ $k_t$ ” menores.

### **V.1.6 Aplicação de campo elétrico mantendo a temperatura constante**

Manter a temperatura constante durante o período de aplicação do campo elétrico foi mais uma alternativa verificada para tentar reduzir o tempo dispendido no processo de apodização. No caso de se utilizar como isolante o óleo mineral Nujol, a redução do tempo de apodização representa maior vida útil para o óleo, que evapora acima de 160°C. Os resultados das apodizações em que a temperatura foi mantida constante e igual a 200°C, durante um dado período (5 minutos ou 20 minutos), comparados aos obtidos com apodizações feitas a 220°C, durante os mesmos períodos, mas sem manter a temperatura constante, apresentam valores semelhantes de acoplamento eletromecânico. Estas apodizações (200°C constante e 220°C) foram realizadas com o campo elétrico aplicado desde TA, o que representa mais 10 e 12 minutos, respectivamente, de aplicação de campo elétrico.

### **V.1.7 Aplicação de campo elétrico a altas temperaturas (250°C)**

Com a utilização de um óleo mineral isolante para altas temperaturas (fornecido pela CooperPower), foi possível realizar apodizações com a temperatura de aquecimento do óleo isolante igual a 250°C, sem perda das características dielétricas deste óleo e com a melhor relação tempo *versus* temperatura, que foi a aplicação do campo elétrico por apenas 5 minutos após a temperatura do óleo atingir 250°C; com esta temperatura e este tempo de aplicação do campo de apodização, foi possível reproduzir o mesmo valor de acoplamento eletromecânico do modo espessura e as mesmas reduções nos modos de vibração da cerâmica, obtidos por BUTTON (1998), que foram feitas com o campo aplicado desde 160°C até TA, o que demorava aproximadamente quatro horas e trinta minutos.

Outro resultado importante é que com a aplicação do campo elétrico de apodização por períodos curtos de tempo, conseguimos reproduzir mais facilmente os valores de coeficiente de acoplamento “ $k_t$ ” e os modos de vibração (curva de Fase da Impedância x Freqüência) das cerâmicas apodizadas, enquanto que apodizações realizadas durante períodos mais longos de aplicação do campo elétrico, em geral, proporcionaram valores

bastante variados de “ $k_t$ ”. Podemos confirmar que esta variação obtida em apodizações realizadas por um longo período não foi decorrente de uma possível infiltração nas cerâmicas, porque as mesmas cerâmicas foram despolarizadas e apodizadas novamente com curtos períodos de aplicação de campo elétrico e obtiveram os resultados similares aos outros realizados nas mesmas condições.

## **V.2 TRANSDUTORES CONSTRUÍDOS COM CERÂMICAS EDO E COM *BACKING* DE TUNGSTÊNIO**

Para confirmar os resultados obtidos com as variações no processo de apodização realizadas, foram construídos transdutores com as cerâmicas apodizadas e com as cerâmicas polarizadas uniformemente. Os resultados dos mapeamentos dos campos acústicos gerados por alguns destes transdutores, realizados no plano XY, e mostrando as linhas de contorno de intensidades de  $-3\text{dB}$ ,  $-6\text{dB}$  e  $-20\text{dB}$ , foram apresentados na Figura IV.11. O eixo Y coincidindo com o eixo axial de propagação do campo acústico, e X com o eixo lateral. Observamos que não houve diferença significativa entre o campo gerado pelo transdutor construído com a cerâmica polarizada de fábrica e os campos mapeados a partir dos transdutores construídos com cerâmicas apodizadas. Nota-se que a linha de  $-3\text{dB}$  não se prolongou nos transdutores apodizados como era de se esperar e nem houve uma redução da largura da linha de  $-20\text{dB}$ .

Nos resultados apresentados nas Figuras IV.12 (a), (b) e (e) e IV.13 (a), (b) e (e), observamos pulsos acústicos longos emitidos pelos transdutores quando excitados por um único pulso de tensão, o que não era esperado e que foi relacionado a problemas na construção dos transdutores. Estes problemas poderiam estar relacionados à impedância acústica inadequada das camadas de retaguarda (*backing*) e/ou à infiltração de água através das camadas de acoplamento acústico (*matching*) dos transdutores, ou ainda devido ao tipo do material utilizado ou à espessura inadequada do *matching*. Quanto mais eficientes forem estas camadas, mais as vibrações de reverberação no interior da cerâmica são amortecidas, e mais energia acústica é transmitida para o meio (água), fazendo com que o

pulso acústico gerado seja curto (banda larga) e intenso, o que não ocorreu com os transdutores construídos com cerâmicas EDO Acoustics.

A avaliação dos resultados dos mapeamentos e dos pulsos acústicos gerados pelos transdutores construídos indicou que o principal problema na construção dos transdutores foi à centrifugação do *backing* por oito minutos. Este tempo foi muito longo, o que ocasionou a separação da epóxi do tungstênio, ficando o tungstênio concentrado na região mais próxima da cerâmica, alterando a impedância acústica esperada da camada de retaguarda (*backing*), já que o tungstênio tem uma impedância acústica alta. Transdutores semelhantes construídos no LUS, com camada de retaguarda de epóxi e tungstênio têm a impedância acústica do *backing* igual a  $16\text{Mkg/m}^2\text{s}$ , enquanto o tungstênio sozinho, tem uma impedância acústica maior que a impedância acústica do PZT-5A que é de  $33,7\text{Mkg/m}^2\text{s}$ . Esta separação dos elementos do *backing* foi constatada cortando-se ao meio, no sentido longitudinal, um transdutor construído. Também foram verificados problemas de folga entre os tubos de PVC e de latão, na construção dos transdutores. Os resultados do mapeamento dos transdutores construídos com cerâmica EDO Acoustics foram descartados e foram construídos novos transdutores com *backing* de alumina e epóxi, que possui impedância acústica mais baixa (aproximadamente  $5,5\text{Mkg/m}^2\text{s}$ ), sendo que durante a fase de construção do *backing*, os novos transdutores permaneceram por apenas dois minutos na centrífuga.

### **V.3 TRANSDUTORES CONSTRUÍDOS COM CERÂMICAS EDO E COM *BACKING* DE ALUMINA**

Nos transdutores construídos com cerâmicas EDO, polarizadas e apodizadas, e camada de retaguarda feitas com uma mistura de epóxi e alumina, as etapas de construção foram documentadas e os acoplamentos eletromecânicos foram calculados com o intuito de verificar se estes transdutores estavam apresentando o mesmo comportamento de outros transdutores construídos no LUS, como apresentado na Tabela IV.1. Nas figuras IV.14 a IV.17 foram apresentadas as curvas de Fase da Impedância x Freqüência (nas quais é possível identificar os modos de vibração) durante as etapas de construção. Constatou-se o mesmo comportamento obtido pelos transdutores construídos por BUTTON (1998). As

mesmas reduções dos modos de vibração intermediários apresentadas nos transdutores apodizados se repetiram e o mesmo comportamento de “ $k_t$ ”. A única diferença que prevalecia, era a compatibilização elétrica realizada com indutores, que não foi feita para os transdutores neste trabalho. Então resolveu-se, por tentativas, fazer o *matching* elétrico. Foi escolhido para cada transdutor, um valor de indutor que resultasse no menor valor para o módulo de impedância na frequência de ressonância do modo espessura. Os valores usados foram apresentados na Tabela IV.2. Porém, conforme Figura IV.19, observou-se que o mapeamento no plano XY de um transdutor com indutor e do mesmo sem indutor não apresentava diferença.

Para maiores esclarecimentos, conforme Figura IV.20, os pulsos acústicos gerados por transdutores polarizados e apodizados, e captados pelo hidrofone de PVDF foram analisados com e sem indutor. Também não foi constatada nenhuma diferença significativa, nem entre os transdutores com indutor e sem indutor e nem entre os transdutores polarizados e apodizados. Devido aos pulsos gerados por estes novos transdutores serem curtos, descartamos a possibilidade de problemas de construção dos transdutores. As larguras de banda calculadas e apresentadas na Figura IV.21 também se mostraram semelhantes. As linhas Y, perfil axial do campo acústico, conforme mostrado na Figura IV.22, apresentaram um decaimento de  $-3\text{dB}$  em relação à amplitude máxima, para todos os casos, a uma distância entre 102mm e 108mm da face da cerâmica. Em relação às linhas X obtidas, a semelhança dos resultados se confirmou, vide Figuras IV.23 e IV.24.

#### V.4 CERÂMICAS APCI

Pelo fato de não conseguirmos comprovar a eficiência da apodização na redução da difração acústica em transdutores de ultra-som construídos, constatou-se a necessidade de realizar novos testes. Como não se dispunha mais das cerâmicas EDO utilizadas até então, os novos testes foram realizados com cerâmicas APCI de 1mm de espessura e 12,7mm de diâmetro, também de PZT5-A. Cada tipo de apodização, em geral, foi realizado uma só vez, devido ao baixo número de cerâmicas disponíveis (sete). Um transdutor utilizando cerâmica polarizada foi construído para comparação.

Foram feitas apodizações com temperatura igual a 250°C, com o campo aplicado por 2 minutos e por 5 minutos, para verificar se neste último caso haveria a possibilidade da cerâmica estar sendo polarizada em vez de apodizada. O perfil do campo elétrico de apodização, produzido com o eletrodo esférico com 5mm de raio, aplica um campo de intensidade 1kV/mm na borda da cerâmica que está sendo apodizada, que é metade da intensidade do campo aplicado no centro da cerâmica, porém suficiente para polarizar esta região a 250°C, conforme os resultados apresentados por HOOKER (1998).

Apodizações com cerâmicas APCI, com temperaturas mais baixas (160°C e 200°C) também foram realizadas com o mesmo propósito.

Uma apodização utilizando um eletrodo esférico de raio menor (3mm) foi feita para checar se uma redução no campo elétrico aplicado nas bordas da cerâmica provocaria alteração no campo acústico final. Resultou em redução do acoplamento (0,40,23 para 0,3927) e de profundidade de campo acústico (101mm para 95mm) comparada a apodização realizada com eletrodo esférico de 5mm nas mesmas condições.

Um último teste realizado foi o de despolarizar uma cerâmica e repolarizá-la de novo, sem apodização, com campo uniforme aplicado de 1kV/mm, a 250°C durante 5 minutos, o que resultou em um coeficiente de acoplamento do modo espessura semelhante ao da polarização original (de 0,4562 para 0,4532)

Nas Tabelas IV.5 (a) e (b) foram resumidos os resultados destes testes, com os valores dos coeficientes de acoplamento eletromecânico do modo espessura e suas respectivas frequências (ressonância e anti-ressonância).

Um detalhe que vale ressaltar, é que para as cerâmicas apodizadas que apresentaram um acoplamento eletromecânico no modo espessura mais baixo (cerâmicas 50\_1, 51 e 55\_1), as curvas de fase da impedância em função da frequência, apresentaram 2 picos entre as frequências de ressonância e de anti-ressonância, em relação às curvas das Figuras IV.28 a

IV.33, obtidas com a cerâmica vibrando livre, que apresentam um pequeno pico localizado após os dois picos destacados. Nas curvas de Fase *versus* Frequência das cerâmicas que obtiveram acoplamento eletromecânico mais elevado, nota-se que são 3 os picos que se destacam na região de frequências do modo espessura (fase positiva).

Na etapa final da realização deste trabalho, o Sistema de Mapeamento apresentou problemas de mau-funcionamento (relação sinal ruído muito elevada e perda de passos), que não permitiram a realização do mapeamento de todas as linhas Y e todas as linhas X dos transdutores construídos com cerâmica APCI; porém, foi possível determinar a amplitude máxima do campo e distância do decaimento de  $-3\text{dB}$  desta amplitude, realizando o mapeamento manual, sem aquisição de dados.

Não foram observadas diferenças significativas nos perfis laterais, linhas X, dos campos dos transdutores, e não conseguimos constatar resultados expressivos nas larguras de banda calculadas através dos pulsos captados pelo hidrofone na região do campo distante, largura de banda esta que está associada à qualidade do *matching* e do *backing* do transdutor.

Porém, conseguimos, nestes transdutores, constatar diferenças na profundidade de alcance do campo, através da linha de contorno de intensidades  $-3\text{dB}$  abaixo da intensidade máxima medida na distância de separação dos campos próximo e distante. O transdutor apodizado a  $250^\circ\text{C}$  durante 2 minutos apresentou um alcance máximo da linha de  $-3\text{dB}$  em  $107\text{mm}$  de distância da face da cerâmica; a cerâmica apodizada a  $250^\circ\text{C}$  durante 5 minutos apresentou alcance máximo de  $101\text{mm}$ ; o transdutor construído com a cerâmica apodizada com o eletrodo esférico de raio  $3\text{mm}$ , a  $250^\circ\text{C}$  por 5 minutos, apresentou alcance máximo da linha de  $-3\text{dB}$  em  $95\text{mm}$ ; e os transdutores construídos com cerâmicas; polarizada e apodizada a  $200^\circ\text{C}$ , desde TA por mais 20 minutos, apresentaram profundidades das linhas de  $-3\text{dB}$  iguais a  $89\text{mm}$  e  $88\text{mm}$  respectivamente.

O transdutor construído com a cerâmica apodizada a  $160^\circ\text{C}$  até TA, apresentou problemas na construção e não pôde ser concluído.

Outro detalhe que vale ser observado é que as cerâmicas da EDO de 0,885mm de espessura, apodizadas a 250°C durante 5 minutos apresentaram acoplamento eletromecânico elevado, próximo ao da cerâmica polarizada de fábrica. Na cerâmica APCI com 1mm de espessura, apodizada a 250°C durante 5 minutos, não foi constatado o mesmo acoplamento.

## V.5. CONCLUSÃO

Com os últimos resultados apresentados, foi possível verificar que a diferença entre as curvas de Fase da Impedância *versus* Freqüência, para cerâmicas apodizadas e polarizadas, não está apenas na redução dos modos intermediários de vibração, entre os modos radial e espessura; é preciso avaliar também, o comportamento da curva de fase na região das freqüências do modo espessura de vibração da cerâmica vibrando livre. Os transdutores construídos com cerâmicas apodizadas que não apresentaram um terceiro pico destacado na curva de Fase da Impedância *versus* Freqüência, entre as freqüências de ressonância e de anti-ressonância do modo espessura, apresentaram maior profundidade de campo acústico. Este aumento na profundidade de campo indica uma maior redução da difração acústica, devido à diminuição das ondas de borda na composição do campo. Em suma, um acoplamento eletromecânico do modo espessura alto, não é necessariamente sinal de que a cerâmica está apodizada, por mais que haja redução dos modos intermediários de vibração. O acoplamento alto pode significar que a relação tempo *versus* temperatura no processo de apodização, foi acima do necessário, ocasionando um alinhamento também dos domínios localizados na região de borda (que irão reforçar a vibração da região da borda). Resultado que é reforçado com o teste realizado com a cerâmica 56 (repolarização uniforme a 1kV/mm). Isto significa, que nos transdutores iniciais, além dos problemas com o *backing*, acabamos desconsiderando cerâmicas que poderiam estar mais eficientemente apodizadas ( $k_t$  baixo). Outra constatação importante é que para cada espessura de cerâmica há uma relação de tempo *versus* temperatura diferente, mesmo mantendo constantes o tamanho do eletrodo esférico e o campo elétrico de 2kV/mm de espessura aplicado no centro da cerâmica. Isto se comprovou com os resultados das apodizações realizadas a 250°C durante 5 minutos, com cerâmicas de espessuras 0,885mm e 1mm.

A redução do eletrodo esférico permitiu uma diminuição da intensidade do campo nas bordas da cerâmica, apresentando um transdutor com uma distância de linha de decaimento de  $-3\text{dB}$  maior que a de um transdutor polarizado e que possuía um acoplamento eletromecânico mais alto, constatando que somente o acoplamento eletromecânico elevado não é sinal de qualidade de apodização.

Podemos afirmar que para as cerâmicas de PZT5-A com 1mm de espessura e 12,7mm de diâmetro, com um campo elétrico aplicado de  $2\text{kV/mm}$ , conseguimos reduzir o processo de apodização que demorava várias horas, para 2 minutos de aplicação de campo elétrico de apodização, quando a temperatura do óleo isolante usada é de  $250^{\circ}\text{C}$ .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANGELOTTI, L. **Manual do Engenheiro Eletrônico**. São Paulo: Hemus, 1982. v. 1.
2. ARNOLD, F. J. **O Pré-Tensionamento Mecânico em Transdutores Piezoelétricos**. Campinas, 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Biomédica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
3. BRADY, J. E.; HUMISTON, G. E. **General Chemistry: Principles and Structure**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1982.
4. BRISSAUD, M. Characterization of Piezoceramics. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency**, v. 38, 1991.
5. BRITAIN, R.H.; WEIGHT, J.P. Fabrication of Non-Uniformly Excited Wide-Band Ultrasonic Transducers. **Ultrasonics**, v.25., 1987.
6. BUTTON, V. L. S. N. **Efeitos da Polarização Não-Uniforme de Cerâmicas Piezoelétricas no Campo de Transdutores de Ultra-som**. Campinas, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Biomédica (DEB), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
7. BUTTON, V. L. S. N. et al. Diffractive Limited Acoustic Field of an Apodized Ultrasound Transducer. In: SPIE'S INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MEDICAL IMAGING, 2000, San Diego. **Proceedings of the Spie's International Symposium on Medical Imaging**, v. 3982: pp.132-141.
8. BUTTON, V. L. S. N., COSTA, E. T.; MAIA, J. M. Non-uniform Piezoelectric Ceramic Polarisation: Minimising Ultrasound Field Diffraction. In:

- ACOUSTICAL IMAGING, 25., 2000, Bristol. **Proceedings of the 25<sup>th</sup> Acoustical Imaging**: Michael Halliwell and Peter N. T. Wells, pp. 131-136.
9. EDO CORPORATION ACOUSTIC DIVISION - **Piezoelectric Ceramics - Material Specifications Typical Applications**. New York, 199-. Catálogo.
  10. GARCIA, E. A.C. **Biofísica**. São Paulo: Sarvier Editora de Livros Médicos, 2000.
  11. HOLLAND, R.; EERNISSE, E.P. **Design of Resonant Piezoelectric Devices**. Massachusetts Institute of Technology, 1969.
  12. HOOKER, M.W. **Properties of PZT – Based Piezoelectric Ceramics Between - 150 and 250°C**. Hampton: NASA Langley Research Center, 1998.
  13. IBRAHIM, R. C. **Caracterização de Propriedades Físicas de um Material Cerâmico Ferroelétrico do Sistema PZT**. Campinas, 1991. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
  14. ICHINOSE, N. **Introduction to Fine Ceramics**. Japan: Waseda University, 1983.
  15. IEEE STANDARD ON PIEZOELECTRICITY. **ANSI/IEEE Standard 176**. An American National Standard, 1987.
  16. IEEE STANDARD ON PIEZOELECTRICITY. **Standard 176**: An American National Standard. New York, 1978.
  17. IEEE STANDARD. **Definitions of Primary Ferroelectric Terms**. An American National Standard, 1985.

18. JAFFE, B.; COOK Jr., W. R.; JAFFE, H. **Piezoelectric Ceramics**. New York: Academic Press, 1971.
19. JORDAN, T.L.; OUNAIES, Z. **Piezoelectric Ceramics Characterization**. Hampton: ICASE - NASA Langley Research Center, 2001.
20. KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UTTLMANN, D. R. **Introduction to Ceramics**. Ed. 2; John Wiley & Sons, Inc. 1976.
21. LEITE, R.C.C; CASTRO A.R.B. **Física do Estado Sólido**. São Paulo: Edgard Blucher, 1978.
22. LINES, M. E.; GLASS, A. M. **Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials**. Oxford: Clarendon Press, 1977.
23. MERZ, W. J.; FATUZZO, E. **Ferroelectricity**. Amsterdam: North-Holland ,1967. v. 7.
24. NICACIO, H; Costa, E. T. Simulação de Pulsos Ultra-Sônicos de Transdutores Apodizados Baseada no Método de Espectro de Diretividade. **Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica**, Florianópolis, 2000.
25. PHILLIPS, J. R. **Piezoelectric Technology Primer**. CTS Wireless Components: New Mexico, 1997.
26. PI (PhysikInstrumente). **Fundamentals of Piezoelectricity and Piezo Actuators**. Disponível em: <[www.physikinstrumente.com/tutorial/4\\_15.html](http://www.physikinstrumente.com/tutorial/4_15.html)> Acesso em 06/12/2002..

27. SILVA, E. C. N. **Modelagem Vibracional de Transdutores de Ultra-Som Piezoelétricos Pelo Método De Elementos Finitos**. São Paulo, 1993. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – (SP).
28. STEPANISHEN, P. R. Transient Radiation from Pistons in an Infinite Planar Baffle. **Journal of Acoustical Society of America**, 1971. v. 49, n. 5 (part 2), pp. 1629-1638.
29. VAN VLACK, L. H. **Elements of Materials Science (Princípios de Ciência dos Materiais)**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1964.
30. VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos Materiais Cerâmicos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1973.
31. WEIGHT, J. P.; HAYMAN, A. J. Observations of the Propagation of Very Short Ultrasonic Pulses and Their Reflection by Small Targets. **Journal of Acoustical Society of America**, 1978. v. 63, n. 2, pp. 396-404.
32. WEIGTH, J. P.; RESTORI, M. Diffraction Effects in the Pulsed and Continuous Wave Fields. **Proceedings of Institute of Acoustics**, 1986. v. 8 (part 2), pp. 103-111.

## APÊNDICE I

<b>Documentação de Cerâmicas Polarizadas</b>					
<b>0,885mm espessura - 12,7mm diâmetro</b>					
Frequência - (modo espessura)					
<b>cerâmica</b>	<b>f. Ress. kHz</b>	<b>Z (fr)</b>	<b>f. AntR kHz</b>	<b>Z (far)</b>	<b>k</b>
<b>1</b>	2210,60	6,10 ohms	2503,10	1200,00 ohms	<b>0,4691</b>
<b>2</b>	2240,43	6,07 ohms	2558,92	1076,30 ohms	<b>0,4832</b>
<b>3</b>	2227,62	4,48 ohms	2548,05	884,90 ohms	<b>0,4855</b>
<b>4</b>	2197,56	4,26 ohms	2493,02	1084,10 ohms	<b>0,4722</b>
<b>5</b>	2256,07	6,74 ohms	2565,24	1334,00 ohms	<b>0,4759</b>
<b>6</b>	2271,64	6,67 ohms	2558,59	1191,80 ohms	<b>0,4601</b>
<b>7</b>	2225,77	5,03 ohms	2546,59	845,10 ohms	<b>0,4859</b>
<b>8</b>	2294,47	5,54ohms	2580,43	1321,00 ohms	<b>0,4576</b>
<b>9</b>	2245,90	5,56 ohms	2560,28	878,70 ohms	<b>0,4801</b>
<b>10</b>	2275,08	6,61 ohms	2564,84	1233,10 ohms	<b>0,4617</b>
<b>11</b>	2235,30	6,31 ohms	2546,54	1089,40 ohms	<b>0,4791</b>
<b>12</b>	2228,70	5,68 ohms	2526,06	1173,30 ohms	<b>0,4707</b>
<b>13</b>	2262,46	7,42 ohms	2575,00	1368,00 ohms	<b>0,4775</b>
<b>14</b>	2255,40	7,94 ohms	2571,15	1280,00 ohms	<b>0,4801</b>
<b>15</b>	2254,20	6,23 ohms	2561,03	983,20 ohms	<b>0,4746</b>
<b>16</b>	2244,10	6,68 ohms	2549,91	867,80 ohms	<b>0,4748</b>
<b>17</b>	2221,48	5,47 ohms	2516,56	1335,00 ohms	<b>0,4699</b>
<b>18</b>	2247,82	6,77 ohms	2560,72	1179,20 ohms	<b>0,4790</b>
<b>19</b>	2241,62	6,66 ohms	2544,30	1251,20 ohms	<b>0,4730</b>
<b>20</b>	2234,27	5,72 ohms	2529,56	1392,00 ohms	<b>0,4689</b>
<b>21</b>	2250,00	16,72 ohms	2523,00	551,60 ohms	<b>0,4524</b>
<b>24</b>	2250,83	7,52 ohms	2618,00	1271,60 ohms	<b>0,5107</b>
<b>25</b>	2220,00	7,12 ohms	2516,00	1008,30 ohms	<b>0,4706</b>
<b>26</b>	2236,08	3,31 ohms	2545,47	1027,60 ohms	<b>0,4778</b>
<b>27</b>	2244,46	3,53 ohms	2549,94	1060,80 ohms	<b>0,4746</b>
<b>28</b>	2211,05	2,72 ohms	2509,32	1007,10 ohms	<b>0,4729</b>
<b>29</b>	2238,33	2,70 ohms	2558,57	935,50 ohms	<b>0,4844</b>
<b>30</b>	2216,63	2,49 ohms	2510,29	1009,40 ohms	<b>0,4693</b>
<b>31</b>	2165,00	3,04 ohms	2452,00	1417,00 ohms	<b>0,4695</b>
<b>32</b>	2232,00	2,27 ohms	2552,00	878,40 ohms	<b>0,4848</b>
<b>33</b>	2236,00	3,00 ohms	2550,00	1016,30 ohms	<b>0,4807</b>

<b>Documentação de Cerâmicas Polarizadas (continuação)</b>					
<b>0,885mm espessura - 12,7mm diâmetro</b>					
Frequência - (modo espessura)					
<b>34</b>	2236,00	3,19 ohms	2531,00	925,80 ohms	<b>0,4685</b>
<b>35</b>	2189,00	2,46 ohms	2479,00	1034,30 ohms	<b>0,4693</b>
<b>36</b>	2201,00	2,51 ohms	2492,00	1288,40 ohms	<b>0,4689</b>
<b>37</b>	2242,00	3,01 ohms	2557,00	971,10 ohms	<b>0,4808</b>
<b>38</b>	2240,00	3,90 ohms	2555,00	1208,60 ohms	<b>0,4810</b>
<b>39</b>	2300,00	4,14 ohms	2581,00	1447,00 ohms	<b>0,4538</b>
<b>40</b>	2255,00	3,62 ohms	2577,00	1068,50 ohms	<b>0,4840</b>
<b>41</b>	2225,00	3,63 ohms	2516,00	1215,00 ohms	<b>0,4668</b>
<b>42</b>	2291,00	3,63 ohms	2578,00	1256,70 ohms	<b>0,4585</b>

## APÊNDICE II

<b>Documentação das Principais Cerâmicas Apodizadas</b>							
<b>0,885mm espessura - 12,7mm diâmetro</b>							
<b>cerâmica</b>	<b>f. Res. kHz</b>	<b>Z (fr)</b>	<b>f. AntR. kHz</b>	<b>Z (fr)</b>	<b>k</b>	<b>temp °C</b>	<b>tempo (min)</b>
<b>8</b>	2391,70	0,73 ohms	2424,18	7,25 ohms	<b>0,1631</b>	120	TA
<b>12</b>	2333,26	11,43 ohms	2363,99	107,71 ohms	<b>0,1607</b>	140	TA
<b>4</b>	2321,63	12,95 ohms	2342,00	74,86 ohms	<b>0,1316</b>	160	4
<b>1</b>	2250,50	4,15 ohms	2542,56	854,30 ohms	<b>0,4653</b>	160	TA
<b>28.2.1</b>	2236,50	8,30 ohms	2527,00	588,10 ohms	<b>0,4655</b>	160	TA
<b>22.1.2R</b>	2341,00	4,27 ohms	2519,00	512,20 ohms	<b>0,3692</b>	160	TA até TA
<b>22.1.2RR</b>	2350,00	4,52 ohms	2492,00	286,00 ohms	<b>0,3327</b>	160	TA até TA
<b>27.2.2RR</b>	2285,00	10,41 ohms	2493,00	337,70 ohms	<b>0,3999</b>	160	TA até TA
<b>2</b>	2358,17	9,27 ohms	2402,51	217,80 ohms	<b>0,1912</b>	160	120
<b>16.2.11</b>	2365,80	7,94 ohms	2427,40	202,60 ohms	<b>0,2239</b>	160	TA até 120
<b>3</b>	2357,66	13,19 ohms	2391,52	97,73 ohms	<b>0,1677</b>	160	20
<b>5</b>	2359,74	6,58 ohms	2432,14	252,60 ohms	<b>0,2422</b>	160	TA até 20
<b>19</b>	2357,00	16,79 ohms	2402,00	115,48 ohms	<b>0,1927</b>	160	TA até 20
<b>19.2.19</b>	2328,05	4,40 ohms	2499,58	671,10 ohms	<b>0,3641</b>	160	TA até 20
<b>10</b>	2352,10	13,91 ohms	2418,30	153,00 ohms	<b>0,2324</b>	160	TA até 60
<b>18</b>	2323,00	8,53 ohms	2550,00	205,90 ohms	<b>0,4124</b>	160	TA até 60
<b>27.1.18</b>	2327,95	8,56 ohms	2398,11	312,90 ohms	<b>0,2401</b>	160	TA até 60
<b>7</b>	2323,13	6,08 ohms	2436,82	176,20 ohms	<b>0,3019</b>	200	20
<b>3.2.7</b>	2361,02	6,68 ohms	2483,31	273,00 ohms	<b>0,3099</b>	200	20
<b>16</b>	2341,18	6,38 ohms	2409,28	360,30 ohms	<b>0,2361</b>	200	60
<b>20.1.16</b>	2295,40	4,33 ohms	2491,37	390,40 ohms	<b>0,3888</b>	200	60

<b>Documentação das Principais Cerâmicas Apodizadas (continuação)</b>							
<b>0,885mm espessura - 12,7mm diâmetro</b>							
<b>14</b>	2337,65	4,54 ohms	2523,53	485,60 ohms	<b>0,3767</b>	200	TA até 20
<b>5.2.14</b>	2382,00	5,49 ohms	2539,52	480,90 ohms	<b>0,3467</b>	200	TA até 20
<b>11.2.9</b>	2341,35	5,47 ohms	2517,45	639,80 ohms	<b>0,3674</b>	200	TA até 20
<b>22_2</b>	2338,00	5,18 ohms	2521,00	239,60 ohms	<b>0,3740</b>	200	TA até 20
<b>26_2</b>	2287,00	3,48 ohms	2476,00	390,00 ohms	<b>0,3832</b>	200	TA até 20
<b>35</b>	2262,00	4,72 ohms	2428,00	607,80 ohms	<b>0,3634</b>	200	TA até 20
<b>15</b>	2338,20	10,06 ohms	2527,05	268,10 ohms	<b>0,3793</b>	200	TA até 60
<b>13.2.15</b>	2357,05	7,48 ohms	2548,10	313,50 ohms	<b>0,3799</b>	200	TA até 60
<b>12.3.15</b>	2293,58	6,66 ohms	2568,74	643,50 ohms	<b>0,4503</b>	200	TA até 60
<b>21.1.15</b>	2250,00	16,72 ohms	2523,00	551,60 ohms	<b>0,4524</b>	200	TA até 60
<b>8.2</b>	2348,00	6,71 ohms	2614,00	701,40 ohms	<b>0,4395</b>	200	TA até TA
<b>26.1.8.2</b>	2277,80	5,62 ohms	2484,10	264,80 ohms	<b>0,3990</b>	200	TA até TA
<b>4.2</b>	2286,23	3,77 ohms	2465,53	39,12 ohms	<b>0,3744</b>	200	TA
<b>30.1.1R</b>	2295,00	6,37 ohms	2416,00	256,50 ohms	<b>0,3125</b>	200	TA
<b>30.1.1RR</b>	2279,00	19,32 ohms	2528,00	405,80 ohms	<b>0,4328</b>	200	TA
<b>16.3</b>	2328,03	3,73 ohms	2593,15	816,80 ohms	<b>0,4405</b>	220	TA até 20
<b>34</b>	2252,00	3,9 ohms	2546,00	646,50 ohms	<b>0,4665</b>	220	TA até 20
<b>39_1</b>	2338,00	4,03 ohms	2617,00	798,40 ohms	<b>0,4493</b>	220	TA até 20
<b>40</b>	2323,00	4,06 ohms	2610,00	830,00 ohms	<b>0,4559</b>	220	TA até 20
<b>42</b>	2330,00	4,13 ohms	2611,00	571,40 ohms	<b>0,4513</b>	220	TA até 20
<b>37</b>	2229,00	13,37 ohms	2623,50	274,10 ohms	<b>0,5274</b>	220	160 até 20
<b>33.3</b>	2293,00	3,77 ohms	2554,00	679,30 ohms	<b>0,4404</b>	220	TA até 5
<b>35.3</b>	2225,50	11,81 ohms	2481,00	307,20 ohms	<b>0,4420</b>	220	TA até 5
<b>3.3</b>	2345,00	5,95 ohms	2498,00	193,00 ohms	<b>0,3446</b>	160 cte	TA até 20
<b>19.3</b>	2319,00	3,59 ohms	2596,00	820,00 ohms	<b>0,4495</b>	200 cte	TA até 20
<b>23.2.19.3</b>	2313,00	3,40 ohms	2593,00	1027,10 ohms	<b>0,4520</b>	200 cte	TA até 20
<b>33</b>	2259,00	6,93 ohms	2550,00	720,00 ohms	<b>0,4639</b>	200 cte	TA até 20
<b>30.3</b>	2266,00	4,52 ohms	2541,00	758,20 ohms	<b>0,4525</b>	200 cte	TA até 10
<b>33.2</b>	2285,00	4,48 ohms	2534,00	412,00 ohms	<b>0,4323</b>	200 cte	TA até 10
<b>36.2</b>	2247,50	4,10 ohms	2509,00	555,80 ohms	<b>0,4445</b>	200 cte	TA até 10
<b>36</b>	2257,00	5,32 ohms	2393,00	243,10 ohms	<b>0,3323</b>	200 cte	TA até 5
<b>35.2</b>	2262,00	4,25 ohms	2434,00	610,70 ohms	<b>0,3692</b>	200 cte	TA até 5
<b>39</b>	2326,00	3,39ohms	2600,00	672,30 ohms	<b>0,4468</b>	250	220 até 5
<b>39_2</b>	2332,00	5,74 ohms	2609,00	444,80 ohms	<b>0,4484</b>	250	5
<b>40_1</b>	2316,00	5,32 ohms	2594,00	410,20 ohms	<b>0,4504</b>	250	5
<b>42_1</b>	2328,00	4,00 ohms	2615,00	463,10 ohms	<b>0,4555</b>	250	5