

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

11
nota final
9,8 (nota neta)
nm

**Desenvolvimento de transdutores piezelétricos de ultra-som
para aplicação em ensaios não destrutivos**

Marcos Jun Tsuchie
Valter Makoto Omori

São Paulo
2005

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

**Desenvolvimento de transdutores piezelétricos de ultra-som
para aplicação em ensaios não destrutivos**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia.

Marcos Jun Tsuchie
Valter Makoto Omori

Orientador: Prof. Dr. Flávio Buiochi

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

São Paulo
2005

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011858

1494709

FICHA CATALOGRÁFICA

Tsuchie, Marcos Jun

Desenvolvimento de transdutores piezelétricos de ultra-som para aplicação em ensaios não destrutivos / M.J. Tsuchie, V.M. Omori. -- São Paulo, 2005.

91 p.

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

1. Transdutores piezelétricos 2. Ensaios não destrutivos I. Omori, Valter Makoto II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Dr. Flávio Buiochi, pela atenção e apoio durante a orientação, ao Laboratório de Ultra-Som da Escola Politécnica, pelos equipamentos disponibilizados, ao aluno de pós-graduação Marco Aurélio Brizzotti, pelo auxílio e atenção durante a realização deste trabalho, e a todos os amigos da turma que de alguma forma ajudaram na realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho consiste no projeto e construção de dois tipos de transdutores piezelétricos de ultra-som para aplicação em ensaios não destrutivos, um monoelemento e outro duplo-elemento. Estudaram-se os processos de fabricação de transdutores piezelétricos de banda larga na faixa de frequência de 1 a 5 MHz. Implementaram-se modelos analíticos unidimensionais que simulam a vibração de transdutores piezelétricos de ultra-som de multicamadas, utilizando-se o software Matlab. Além disso, foram implementados modelos de propagação de ondas acústicas através de interface pelo método dos elementos finitos, utilizando-se o software Ansys. Os resultados experimentais obtidos com os protótipos fabricados foram comparados com as simulações a partir de modelos analíticos e numéricos.

ABSTRACT

This work consists of the design and construction of two types of ultrasonic piezoelectric transducers for application in nondestructive testing: monoelement and dual element. Fabrication processes of wide-band piezoelectric transducers in the range of frequency of 1 to 5 MHz were studied. One-dimensional analytical models were implemented to simulate the vibration of such multilayer transducers, using software Matlab. Moreover, acoustic wave propagation through interface was studied using finite element method, with software Ansys. Experimental results obtained by the prototype were compared with simulated results obtained by analytical and numeric models.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Ensaios Não Destrutivos	7
1.2 Tipos de Ondas	8
1.3 Transdutores Piezelétricos	9
1.3.1 Transdutor Monoelemento	11
1.3.2 Transdutor Duplo-Elemento	11
1.4 Objetivos	12
1.5 Justificativa	13
2 CONCEITOS BÁSICOS	14
2 CONCEITOS BÁSICOS	14
2.1 Resolução Axial	14
2.2 Resolução Lateral	15
2.3 Sensibilidade e Largura de Banda	15
2.4 Frequência, Velocidade e Comprimento de Onda	17
2.5 Fenômenos de transmissão	18
2.6 Campo acústico	21
3 MODELAGEM	23
3.1 Modelo Unidimensional	23
3.2 Método dos elementos finitos	31
4 SIMULAÇÃO	34
4.1 Monoelemento	34
4.2 Duplo-Elemento	36
5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	39
5.1 Transdutor monoelemento	39
5.2 Transdutor duplo-elemento	58
6. MONTAGEM	60
6.1 Montagem do transdutor monoelemento	60
6.2 Montagem do transdutor duplo-elemento	62
7 ENSAIOS	65
7.1 Transdutor monoelemento de um aluno de pós-graduação	66
7.2 Primeiro transdutor monoelemento montado	70
7.3 Segundo transdutor monoelemento montado	72
7.3.1 Sem camada de matching	72
7.3.2 Com camada de matching	78
7.4 Transdutor Duplo-Elemento	84
8 CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Esquema de um transdutor piezelétrico de ultra-som.....	9
Fig. 2- Transdutor Monoelemento.....	11
Fig. 3 – Transdutor Duplo-Elemento.....	12
Fig. 4 – Resolução Axial.....	14
Fig. 5 – Resolução Lateral.....	15
Fig. 6 – Transdutor de banda larga.....	16
Fig. 7 – Transdutor de banda estreita.....	17
Fig. 8 – Conversão de modo entre um líquido e sólido.....	18
Fig. 9 - Coeficiente de transmissão da potência da onda longitudinal.....	20
Fig. 10 - Coeficiente de transmissão da potência da onda de cisalhamento.....	20
Fig. 11 – Campo acústico.....	21
Fig. 12 – Onda plana e onda de borda.....	22
Fig. 13 - Volume elementar.....	24
Fig. 14 – Cerâmica em contato apenas com o ar.....	26
Fig. 15 – Cerâmica piezoelétrica em um meio material.....	27
Fig. 16 - Transdutor piezelétrico com camadas de backing e matching.....	29
Fig. 17 – Transdutor piezelétrico com várias camadas.....	29
Fig. 18 – Transdutor em Emissão.....	30
Fig. 19 – Transdutor em Recepção.....	30
Fig. 20 – Geometria utilizada na simulação.....	34
Fig. 21 – Forma de onda do deslocamento aplicado.....	35
Fig. 22 – Malha utilizada.....	36
Fig. 23 – Esquema do modelo do transdutor duplo-elemento.....	37
Fig. 24 – Malha utilizada no Ansys.....	38
Fig. 25 – Tensão aplicada no transdutor de transmissão.....	38
Fig. 26 – Localização do ponto utilizado para a onda incidente.....	39
Fig. 27 – Localização do ponto utilizado para a onda transmitida.....	40
Fig. 28 – Deslocamento na direção y da onda incidente.....	41
Fig. 29 - Tensão na direção y da onda incidente.....	41
Fig. 30 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 10°.....	42
Fig. 31 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 10°.....	42
Fig. 32 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 10°.....	43
Fig. 33 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 10°.....	43
Fig. 34 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 10°.....	44
Fig. 35 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 20°.....	44
Fig. 36 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 20°.....	45
Fig. 37 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 20°.....	45
Fig. 38 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 20°.....	46
Fig. 39 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 20°.....	46
Fig. 40 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 25°.....	47
Fig. 41 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 25°.....	47
Fig. 42 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 25°.....	48
Fig. 43 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 25°.....	48
Fig. 44 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 25°.....	49
Fig. 45 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 30°.....	49
Fig. 46 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 30°.....	50
Fig. 47 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 30°.....	50
Fig. 48 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 30°.....	51
Fig. 49 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 30°.....	51
Fig. 50 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 40°.....	52
Fig. 51 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 40°.....	52
Fig. 52 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 40°.....	53

Fig. 53 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 40°	53
Fig. 54 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 40°	54
Fig. 55 - Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 50°	54
Fig. 56 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 50°	55
Fig. 57 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 50°	55
Fig. 58 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 50°	56
Fig. 59 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 50°	56
Fig. 60 - Coeficiente de transmissão em potência da onda longitudinal para os modelo em Matlab e modelo em Ansys	57
Fig. 61 - Coeficiente de transmissão em potência da onda shear para os modelo em Matlab e modelo em Ansys	58
Fig. 62 - Dimensões do acrílico e ângulo de inclinação	59
Fig. 63 - Sinal recebido pela cerâmica de recepção	59
Fig. 64 - Transdutor monoelemento com tubo de PVC, cerâmica e fio	60
Fig. 65 - Transdutor monoelemento com tubo de PVC, cerâmica, fio e camada de backing	61
Fig. 66 - Esquema do transdutor monoelemento de frequência 2.2 MHz	62
Fig. 67 - Esquema da peça de acrílico	63
Fig. 68 - Peça de acrílico com as cerâmicas coladas	64
Fig. 69 - Esquema do transdutor duplo-elemento de frequência 2.2 MHz	64
Fig. 70 - Esquema da medição na água	65
Fig. 71 - Esquema de medição no acrílico	65
Fig. 72 - Função de Transferência de Emissão e Recepção	67
Fig. 73 - Sinal de retorno recebido pelo transdutor	67
Fig. 74 - Módulo da impedância elétrica pela frequência no ar	68
Fig. 75 - Fase da impedância pela frequência no ar	68
Fig. 76 - Módulo da impedância elétrica pela frequência na água	69
Fig. 77 - Fase da impedância pela frequência na água	69
Fig. 78 - Resposta impulsiva no acrílico	70
Fig. 79 - FTER no acrílico	71
Fig. 80 - Resposta impulsiva na água	71
Fig. 81 - FTER na água	72
Fig. 82 - Resposta impulsiva no acrílico	73
Fig. 83 - FTER no acrílico	73
Fig. 84 - Resposta impulsiva na água	74
Fig. 85 - FTER na água	75
Fig. 86 - Transdutor com indutor em paralelo	76
Fig. 87 - Valor máximo absoluto em função da indutância para o transdutor sem matching	76
Fig. 88 - Comparação da função de transferência para o transdutor sem indutor, com indutor de 6.8 μ H e com indutor de 15 μ H	77
Fig. 89 - Comparação da resposta impulsiva do transdutor sem indutor e com indutor de 6.8 μ H utilizando o transdutor sem matching	78
Fig. 90 - Comparação da resposta impulsiva na água	79
Fig. 91 - Comparação da FTER na água	80
Fig. 92 - Comparação da resposta impulsiva no acrílico	81
Fig. 93 - Comparação da FTER no acrílico	81
Fig. 94 - Valor máximo absoluto em função da indutância para o transdutor com matching	82
Fig. 95 - Comparação da FTER entre o transdutor sem indutor, com indutor de 0.68 μ H e com indutor de 47 μ H (transdutor com matching)	83
Fig. 96 - Comparação da resposta impulsiva do transdutor sem indutor e com indutor de 0.68 μ H	84
Fig. 97 - Esquema da medição com o transdutor duplo-elemento	85
Fig. 98 - Esquema das reflexões no acrílico e no alumínio	85
Fig. 99 - Sinal recebido para a chapa de 3 mm	86
Fig. 100 - Sinal recebido para a chapa de 6 mm	87
Fig. 101 - Sinal recebido para a chapa de 11 mm	88

1 INTRODUÇÃO

Transdutor é um dispositivo que converte uma forma de energia em outra. Em ultra-som os transdutores mais típicos são os piezelétricos (Gallego-Juárez, 1989).

Os transdutores piezelétricos de baixas frequências, na ordem de alguns kHz, são utilizados em posicionadores de peças, medidores de nível, motores piezelétricos, etc. Já os de alta frequência, na ordem de alguns MHz, são utilizados em imagens ultra-sônicas, ensaios não destrutivos, diagnósticos médicos, aplicações terapêuticas, entre outras.

Muitos transdutores podem ser classificados em dois grupos principais: transdutores de banda estreita e transdutores de banda larga. Transdutores de banda estreita são usados principalmente em aplicações de alta intensidade, em que baixas frequências de 20-100 kHz são predominantes. Já os transdutores de banda larga são usados em detecção, medição e aplicações de controle de ensaios não destrutivos, utilizando pulsos ultra-sônicos curtos e frequências na faixa de 0.5-50 MHz (Gallego-Juárez, 1989).

A principal finalidade do ensaio não destrutivo por ultra-som é a detecção de descontinuidades internas em materiais ferrosos e não ferrosos, metálicos e não metálicos, através da introdução de um feixe acústico com características compatíveis com a estrutura do material a ser inspecionado. Se o feixe acústico for introduzido numa direção favorável em relação à descontinuidade (interface), e for refletido por esta, será gerado um eco. Algumas descontinuidades superficiais também podem ser detectadas com este ensaio não destrutivo.

1.1 Ensaios Não Destrutivos

O objetivo do ensaio não destrutivo é avaliar a vida útil de uma peça com boa confiabilidade, sem causar danos a ela. Além de verificar a existência ou não de defeitos, este ensaio deve fornecer parâmetros quantitativos como tamanho, forma, localização e orientação do defeito.

Os ensaios não destrutivos submetem a peça à ação de um campo físico, como ultra-sônico, magnético, radioativo, entre outros, e analisam a variação dos parâmetros deste campo. De acordo com as variações, detecta-se a presença de defeitos e avaliam-se as características destes.

Neste trabalho será utilizada a técnica de ensaio não destrutivo por ultrassom com a emissão de um pulso por um transdutor que se propagará através da peça. O pulso refletido será analisado e, de acordo com a forma da onda, pode-se saber a existência e parâmetros do defeito.

As vantagens do método ultra-sônico são: possuir alta sensibilidade para a detecção de pequenas discontinuidades como trincas e fissuras; dispensar processos intermediários para interpretar as indicações, agilizando a inspeção; não requerer planos especiais para segurança ou quaisquer acessórios para a sua aplicação. E, além disso, a localização e a interpretação das discontinuidades encontradas são fatores intrínsecos ao exame ultra-sônico.

As desvantagens do método ultra-sônico são: requerer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor; apresentar dificuldade de avaliar peças de pequenas espessuras; requerer o preparo da superfície para a sua aplicação (Andreucci, 2003).

1.2 Tipos de Ondas

Os testes ultra-sônicos de materiais utilizam ondas mecânicas (ou acústicas) colocadas no meio de inspeção. As ondas mecânicas são compostas de oscilações de partículas no meio em que se propagam. A passagem de energia acústica no meio faz com que as partículas oscilem em torno da posição de equilíbrio. Considerando que as partículas podem oscilar em qualquer direção, as ondas acústicas podem ser classificadas em (Andreucci, 2003):

- Ondas Longitudinais (ondas de compressão): ondas cujas partículas oscilam na direção de propagação da onda.
- Ondas Transversais ou Shear (ondas de cisalhamento): ondas cujas partículas oscilam na direção perpendicular ao de propagação.

- Ondas Superficiais ou Ondas de Rayleigh: ondas que se propagam na superfície do sólido.

1.3 Transdutores Piezelétricos

Um transdutor piezelétrico é um dispositivo capaz de vibrar quando é excitado eletricamente. Essa vibração produz um campo de deslocamentos em sua superfície que se propaga pelo meio em contato com o transdutor (modo de emissão). Da mesma forma, uma onda de pressão incidente sobre a superfície de um transdutor produz a deformação do mesmo gerando um sinal elétrico (modo de recepção).

Piezeletricidade descreve o fenômeno da geração de cargas elétricas em um meio, proporcional a uma tensão mecânica aplicada ao mesmo, ou, pelo caminho inverso, uma mudança dimensional (deformação) proporcional a um campo elétrico gerado no meio. Para se observar o fenômeno da piezeletricidade é fundamental que certos eixos do material sejam polarizados. Como materiais piezelétricos mais comuns pode-se citar o Titanato de Bário (TiO_3Ba) e o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT).

Um esquema de um transdutor piezelétrico de ultra-som é mostrado na Fig. 1, sendo formado por um material piezelétrico, uma camada de matching e uma camada de backing.

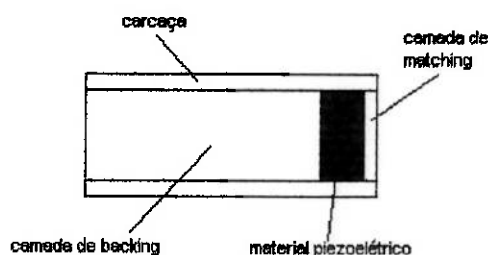


Fig. 1 – Esquema de um transdutor piezelétrico de ultra-som.

A camada de matching tem a finalidade de casar a impedância do material piezelétrico com o meio externo, diminuindo a reflexão de ondas nessa interface. Sabe-se que para a máxima transmissão, essa camada deve ter um comprimento igual a um quarto do comprimento de onda, ou múltiplos inteiros ímpares desse valor, e

impedância acústica igual à média geométrica entre as impedâncias acústicas do material piezelétrico e o meio externo (Silva, 1993).

O cálculo da média geométrica entre as impedâncias acústicas e do número ímpar de quarto de comprimento de onda para a espessura tornam-se dispensáveis caso a camada de acoplamento seja muito menor que $\lambda/4$ (Belassiano, 2004).

O material piezelétrico é a parte ativa de um transdutor ultra-sônico e geralmente tem baixa absorção ultra-sônica, o que resulta em um pulso de longa duração, degradando a resolução axial ou a habilidade de distinguir entre duas estruturas diferentes. Para amortecer a forma de onda, utiliza-se um material de absorção acústica na parte posterior do transdutor conhecido como backing. Seria ideal se este material do backing casasse a impedância acústica do transdutor e ocasionasse alta absorção. Se a impedância acústica do backing é próxima da impedância acústica do transdutor, grande parte da energia ultra-sônica será absorvida pelo backing e como resultado o transdutor terá um pulso de pequena duração com baixa sensibilidade. Por outro lado, utilizando um backing com baixa impedância acústica, o transdutor terá alta sensibilidade já que menos energia será absorvida pelo backing e em contra partida os pulsos emitidos e recebidos são longos devido ao aumento da vibração do transdutor (Grewe, 1990).

O material de absorção acústica mais comumente utilizado nas camadas de backing consiste em resina epóxi com pó de tungstênio. O primeiro por aumentar a absorção do ultra-som e o segundo por aumentar a densidade, aumentando a impedância acústica (Belassiano, 2004).

Os dois parâmetros acústicos mais importantes do material do backing são a impedância acústica e a atenuação. Para transdutores de banda larga o efeito do backing é amortecer a vibração do transdutor, reduzindo o fator mecânico Q_M e aumentando, assim, a largura de banda. O backing é feito de material de alta perda exibindo impedância acústica similar ao material piezelétrico.

Um importante parâmetro a ser considerado nos materiais piezelétricos é o fator de acoplamento eletromecânico (k). Este fator indica a habilidade do material piezelétrico em transformar uma forma de energia em outra, e não deve ser pensado como eficiência do transdutor, uma vez que eficiência é a razão entre a potência útil de saída e a potência de entrada (Gallego-Juárez, 1989).

Eficiência para emissão e eficiência para recepção são características fundamentais que precisam ser maximizadas nos transdutores ultra-sônicos. Ambas características são dependentes diretamente do fator de acoplamento eletromecânico k , em que um alto valor de k é sempre desejável.

1.3.1 Transdutor Monoelemento

Somente um elemento piezelétrico (cerâmica) é utilizado para emitir e receber as ondas ultra-sônicas que se propagam no material. Este é acoplado somente em um lado do material e possibilita a verificação da profundidade da descontinuidade, suas dimensões e localização na peça, conforme mostrado na Fig. 2. Este transdutor trabalha no modo pulso-eco.

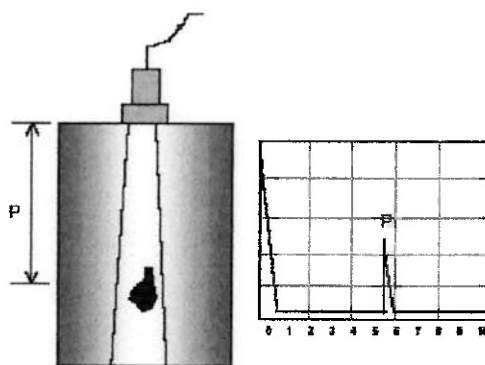


Fig. 2- Transdutor Monoelemento.

1.3.2 Transdutor Duplo-Elemento

Neste tipo de transdutor são utilizadas duas cerâmicas piezelétricas inclinadas, formando ângulo determinado, como mostrado na Fig. 3. Uma das cerâmicas é responsável por emitir uma onda acústica e a outra é responsável por receber a onda acústica e converter em sinal elétrico. Transdutores deste tipo operam no modo transmissão e recepção.

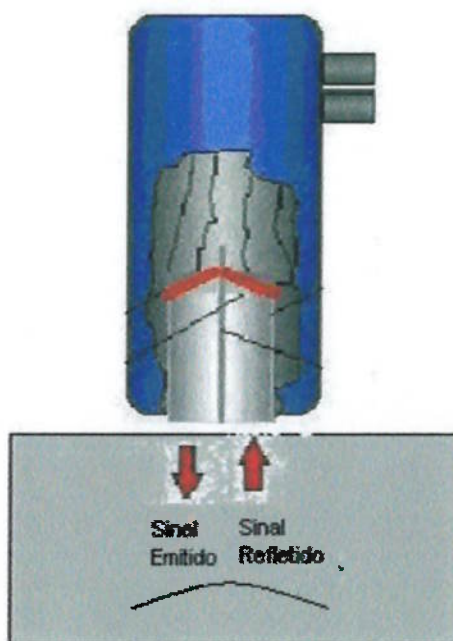


Fig. 3 – Transdutor Duplo-Elemento.

1.4 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo a construção de transdutores piezelétricos de ultra-som, sendo um monoelemento e outro duplo-elemento. Esses protótipos serão ensaiados e os resultados experimentais serão comparados com as simulações a partir de modelos analíticos e numéricos. Para isso, será utilizado um modelo unidimensional para a simulação da vibração de transdutores piezelétricos de ultra-som de multicamadas, utilizando o software Matlab. Com essa simulação serão obtidas a impedância elétrica, a frequência de ressonância, as funções de transferência de emissão e de emissão e recepção, e a resposta impulsiva dessas funções de transferência. Também serão implementados modelos de propagação de ondas acústicas através de interface pelo método dos elementos finitos, utilizando o software Ansys. Com essa análise será determinado o melhor ângulo de incidência da onda acústica que permite a máxima transferência de energia. O transdutor do tipo monoelemento irá operar em modo pulso-eco e o duplo-elemento, em modo transmissão e recepção.

1.5 Justificativa

Atualmente existem muitos campos de aplicação de ultra-som em ensaios não destrutivos, que podem ser aplicados para detecção de falhas em tubos, soldas, estruturas mecânicas entre outras. Por não afetar o normal funcionamento das peças nem as danificar, esse tipo de ensaio considera-se não destrutivo. Neste trabalho serão utilizados transdutores piezelétricos de ultra-som para realizar os ensaios não destrutivos.

Os modelos mais usados para simular o comportamento mecânico e elétrico dos transdutores piezelétricos geralmente introduzem hipóteses simplificadoras. Entre esses modelos, os mais comuns são aqueles que consideram um comportamento unidimensional. Mas as geometrias dos transdutores utilizados na prática são normalmente bi ou tridimensionais, fazendo com que as hipóteses unidimensionais adotadas por esses modelos estejam distantes da realidade. Para a simulação bi ou tridimensional, um conjunto completo de equações fundamentais devem ser resolvidas. O método de elementos finitos encontra-se como uma boa alternativa, uma vez que é suficientemente geral para resolver equações diferenciais e permite manipular geometrias bi e tridimensionais (Silva, 1993).

2 CONCEITOS BÁSICOS

Nesta seção, serão apresentados conceitos que são importantes para o entendimento do trabalho.

2.1 Resolução Axial

Resolução axial é um dos parâmetros que mais influenciam no diagnóstico da qualidade da imagem. Pode ser definido como a capacidade de distinguir estruturas refletoras próximas entre si que se situam em planos diferentes e paralelos à face do transdutor. A Fig. 4 demonstra o princípio da resolução axial. O primeiro sinal (Fig. 4.b) mostra uma onda ultra-sônica passando através de duas estruturas refletoras paralelas à face do transdutor. O diagrama do meio representa um sistema cuja resolução axial é capaz de distinguir as duas estruturas. Já o segundo sinal (Fig. 4.c) representa um sistema cuja resolução axial não é suficiente para distinguir as duas estruturas refletoras.

Vários fatores contribuem para a resolução axial como a natureza dos circuitos de transmissão e recepção, processamento dos sinais e características dos transdutores. Os parâmetros do transdutor que influem na resolução axial são a atenuação e a frequência (ou comprimento de onda).

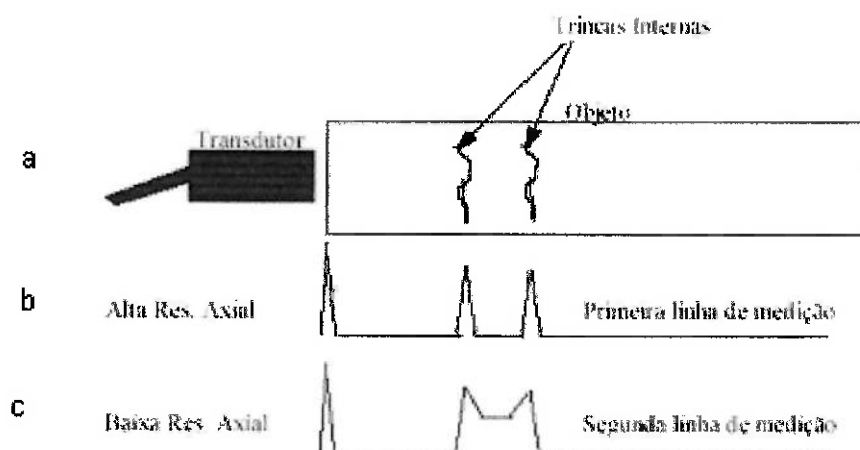


Fig. 4 – Resolução Axial.

2.2 Resolução Lateral

Resolução lateral pode ser definida como a capacidade de distinguir estruturas refletoras próximas entre si e que se situam em planos diferentes e perpendiculares à face do transdutor.

A Fig. 5 ilustra o princípio da resolução lateral. Os dois primeiros diagramas ilustram um sistema capaz de distinguir as duas estruturas. O primeiro diagrama descreve uma onda de ultra-som incidindo em uma das estruturas refletoras, resultando em um pico. O diagrama do meio mostra uma onda de ultra-som passando entre as duas estruturas refletoras. Já o último diagrama ilustra um sistema incapaz de distinguir as duas estruturas refletoras. Nesse último caso, a largura do feixe acústico atinge as duas estruturas refletoras ao mesmo tempo.

Portanto, se a onda acústica é estreita o suficiente para passar entre as duas estruturas refletoras sem incidir em uma delas, é possível distinguir as duas estruturas.

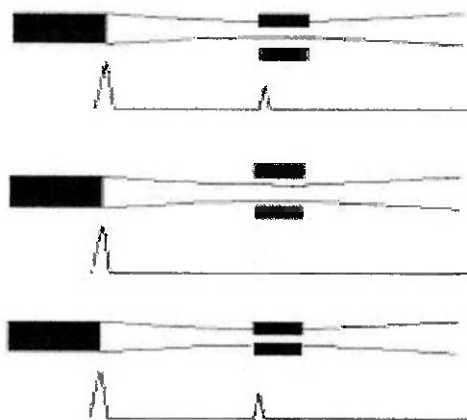


Fig. 5 – Resolução Lateral.

2.3 Sensibilidade e Largura de Banda

Sensibilidade serve para indicar o desempenho dos parâmetros de um sistema por ultra-som que afetam a qualidade da imagem. A sensibilidade de um transdutor indica qual a capacidade de um transdutor converter o estímulo elétrico em energia

acústica e converter o eco recebido em impulsos elétricos. De fato, a sensibilidade de um transdutor é o produto das eficiências de transmissão e recepção.

A largura de banda, que depende principalmente do material do backing, define a sensibilidade do transdutor. Transdutores de alto amortecimento respondem a frequências acima e abaixo da frequência central e são de banda larga apresentando alta resolução. Transdutores de baixo amortecimento exibem banda estreita, baixa resolução, mas alta penetração. Baixas frequências (0.5 MHz – 2.25 MHz) fornecem alta energia e penetração nos materiais, enquanto altas frequências (15 MHz – 25 Mhz) fornecem baixa penetração mas alta resolução para pequenas discontinuidades.

Quanto mais larga a banda de frequências de operação do transdutor, menor o número de ciclos do pulso emitido e menor o seu comprimento. A largura de banda está relacionada com a intensidade de resposta dos diferentes modos de vibrar, dependendo, portanto, das características vibracionais do transdutor. As Figs 6 e 7 ilustram um transdutor de banda larga e outro de banda estreita, respectivamente.

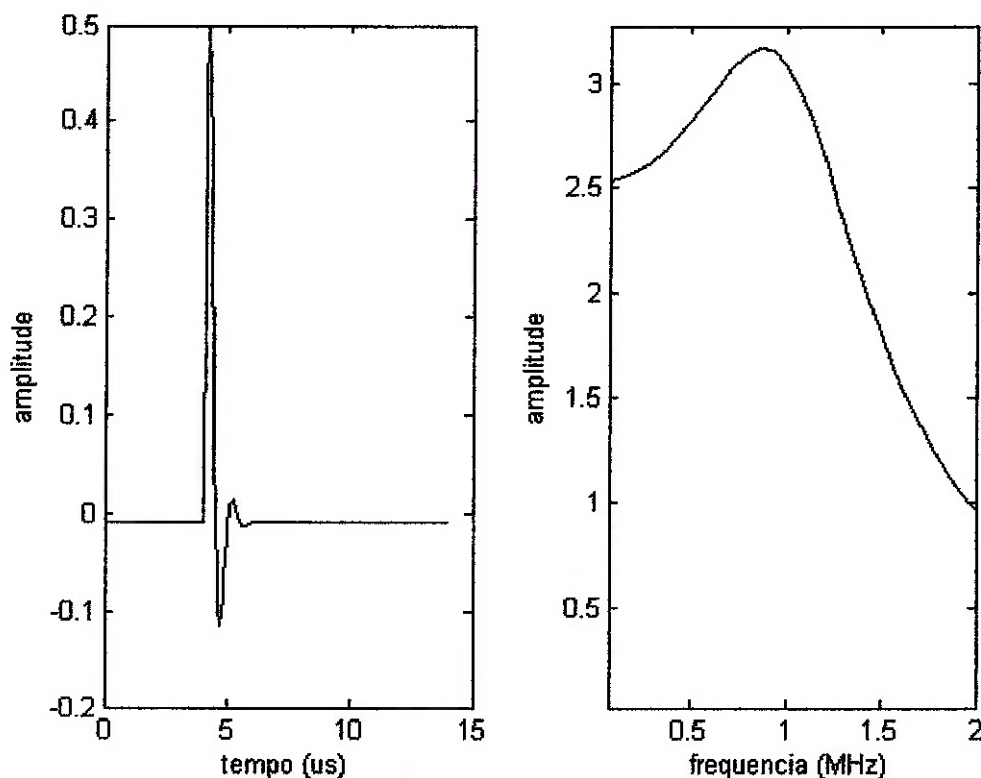


Fig. 6 – Transdutor de banda larga.

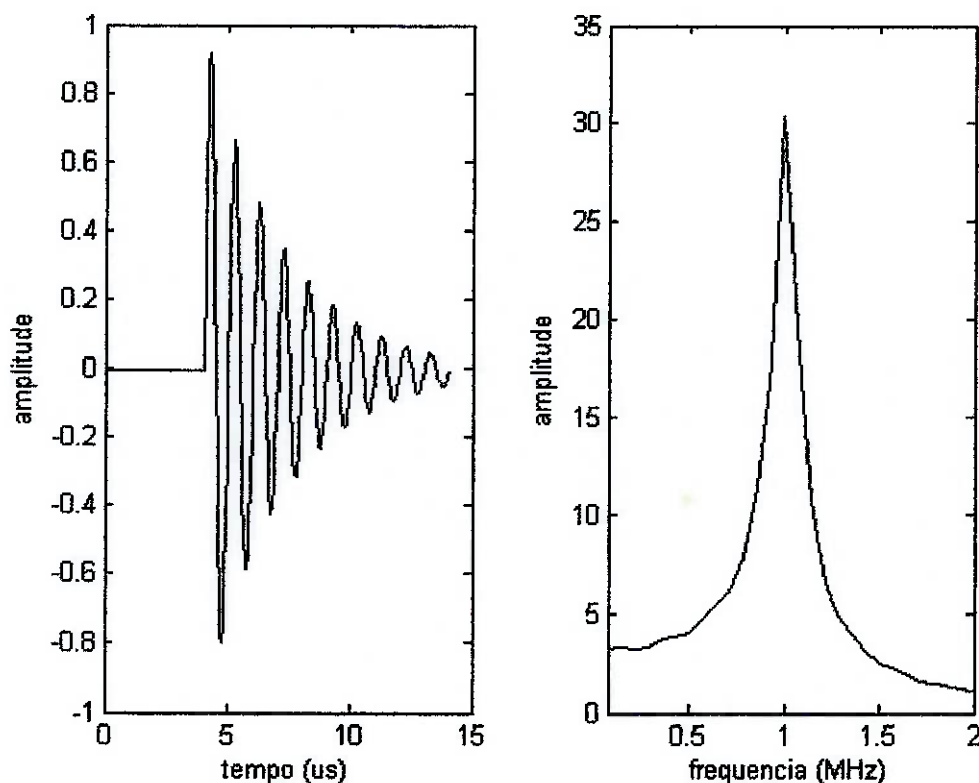


Fig. 7 – Transdutor de banda estreita.

2.4 Frequência, Velocidade e Comprimento de Onda

Frequência é o número de ciclos por segundo e no caso de ondas acústicas representa o número de ondas que passa pelos nossos ouvidos por segundo.

Velocidade de propagação é a distância percorrida pela onda por unidade de tempo e é uma característica do meio, independe da frequência.

Comprimento de onda é a distância entre dos picos ou vales consecutivos.

A relação entre essas grandezas físicas é:

$$c = \lambda f \quad (1)$$

2.5 Fenômenos de transmissão

Se uma onda acústica incide obliquamente sobre uma interface, podem ocorrer reflexão, refração e conversão de modo, de acordo com a Lei de Snell, equação (2), como mostrado na Fig. 8.

$$\frac{\sin \theta_L}{c_L} = \frac{\sin \theta_P}{c_P} = \frac{\sin \theta_{SV}}{c_{SV}} \quad (2)$$

onde, c_L é a velocidade longitudinal da onda incidente, c_P é a velocidade da onda longitudinal transmitida e c_{SV} é a velocidade da onda de cisalhamento.

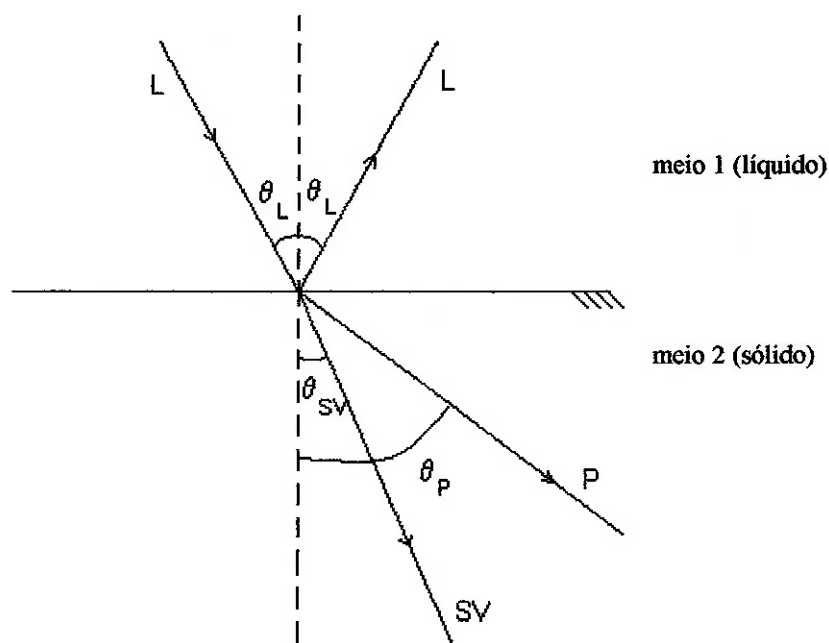


Fig. 8 – Conversão de modo entre um líquido e sólido.

Como a velocidade de ondas longitudinais é maior que a velocidade de ondas transversais (shear) para um material, os ângulos de reflexão e refração de ondas longitudinais são maiores que os da onda shear.

Os coeficientes de reflexão (R) e transmissão (τ), em relação à amplitude, são dados por relações entre as amplitudes dos dois meios, de acordo com as equações 3 e 4.

$$R = \frac{A_R}{A_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (3)$$

$$\tau = \frac{A_T}{A_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (4)$$

onde Z_1 e Z_2 são as impedâncias acústicas dos meios 1 e 2, respectivamente, A_R é a amplitude da onda refletida, A_i é a amplitude da onda incidente e A_T é a amplitude da onda transmitida.

Também é interessante saber a quantidade de energia que é transmitida e refletida. Para isso, utiliza-se o conceito de intensidade acústica, que é a quantidade de energia que atravessa uma unidade de área por unidade de tempo. Os coeficientes de reflexão (R_I) e transmissão (τ_I) de intensidade acústica são dados pelas equações 5 e 6, respectivamente.

$$R_I = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 = R^2 \quad (5)$$

$$\tau_I = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (6)$$

O balanço de energia na interface entre dois meios deve ser mantido, então:

$$R_I + \tau_I = 1 \quad (7)$$

A Fig. 9 ilustra o coeficiente de transmissão em termos de potência para a onda longitudinal em função do ângulo de incidência, para o caso de uma onda acústica incidindo do acrílico para o alumínio. E a Fig. 10 ilustra o coeficiente de transmissão em termos de potência para a onda de cisalhamento em função do ângulo de incidência, para os mesmos materiais da Fig. anterior.

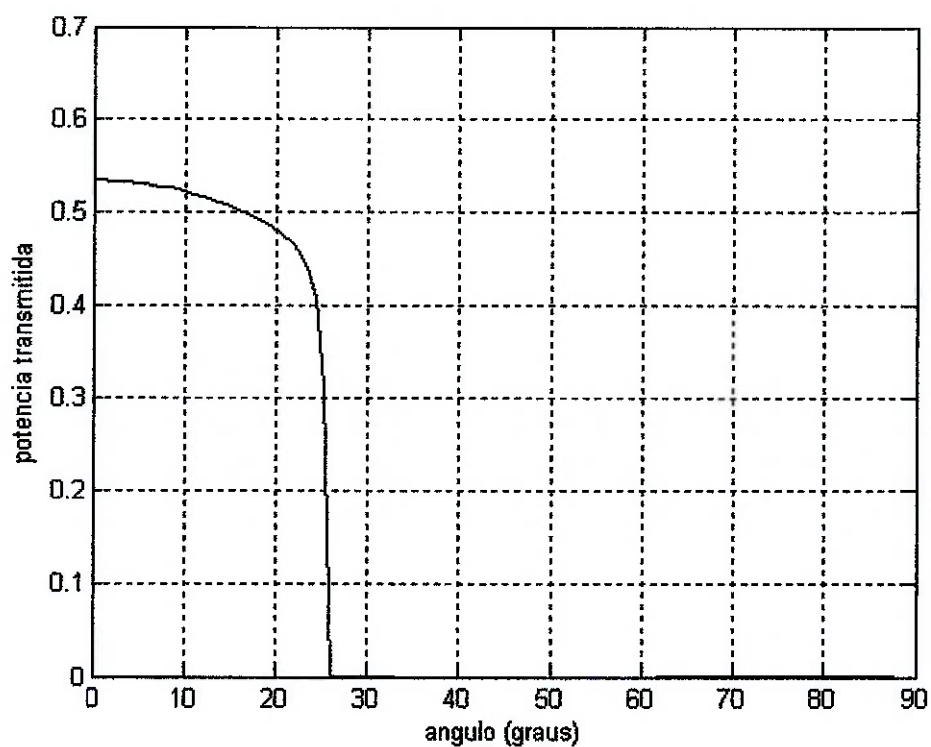


Fig. 9 - Coeficiente de transmissão da potência da onda longitudinal.

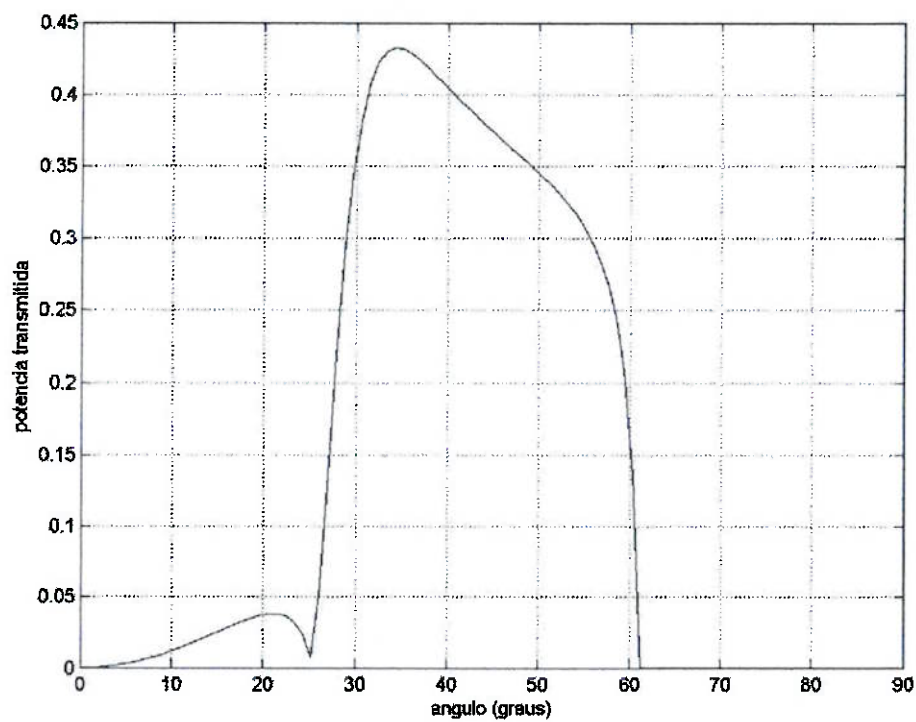


Fig. 10 - Coeficiente de transmissão da potência da onda de cisalhamento.

2.6 Campo acústico

Através do campo acústico, pode-se saber a pressão em um ponto do espaço gerado pelo transdutor. A Fig. 11 a seguir ilustra o campo acústico de um transdutor de 19 mm de diâmetro e 2 MHz de frequência central.

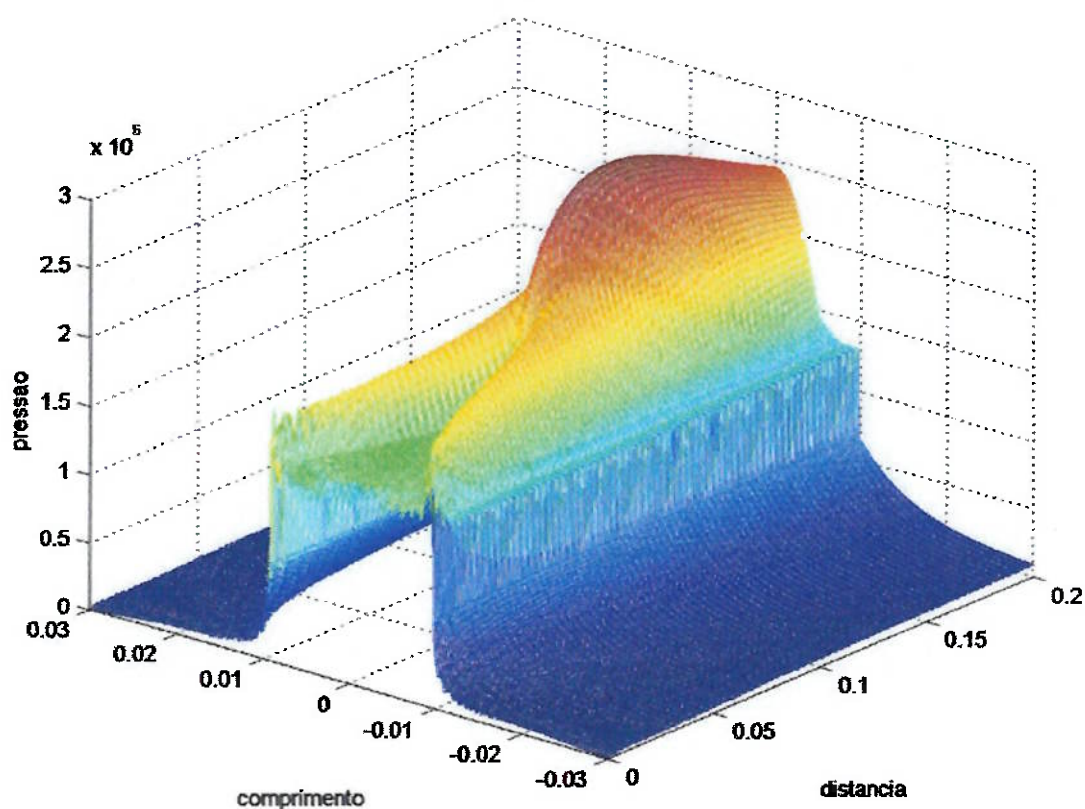


Fig. 11 – Campo acústico.

O campo acústico pode ser entendido como o resultado da soma de dois tipos de onda, a onda plana e a onda de borda, como mostrado na Fig. 12.

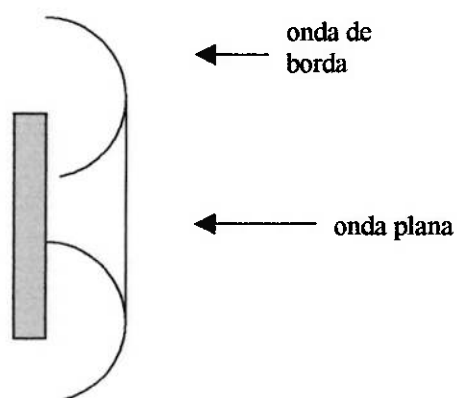


Fig. 12 – Onda plana e onda de borda.

3 MODELAGEM

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos necessários para a modelagem vibracional dos transdutores piezelétricos de ultra-som. O problema não é simples porque os materiais piezelétricos apresentam anisotropia em seu comportamento e o tensor elástico, que relaciona a deformação com a força, e tem no mínimo cinco constantes independentes. Essa força depende do campo elétrico aplicado pelo tensor piezelétrico. E o campo elétrico se relaciona com o deslocamento elétrico através de um tensor de permissividade dielétrica. É necessário conhecer as propriedades dos materiais piezelétricos para modelar as equações dinâmicas da resposta de um transdutor.

3.1 Modelo Unidimensional

Foi utilizado o modelo de (Lamberti et al,1987) para a implementação de um modelo unidimensional de um transdutor piezelétrico. O equacionamento desse transdutor encontra-se listado abaixo.

Em meios piezelétricos tem-se uma relação linear entre as variáveis elétricas e mecânicas, estas equações são descritas num modelo unidimensional de acordo com as equações constitutivas (8) e (9):

$$T_3 = C_{33}^E S_3 - e_{33} E_3 \quad (8)$$

$$D_3 = e_{33} S_3 + \epsilon_{33}^S E_3 \quad (9)$$

onde T_3 é a tensão mecânica,

C_{33}^E é a constante elástica medida a campo elétrico constante,

S_3 é a deformação,

e_{33} é a constante piezelétrica,

E_3 é o campo elétrico,

ϵ_{33}^S é a constante dielétrica medida a deformação constante.

Aplicando a 2ª Lei de Newton para um volume elementar, mostrado na Fig. 13, tem-se:

$$\frac{\partial T_3}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (10)$$

onde z é a direção de propagação da onda,

ρ é a densidade,

u_3 é o deslocamento da partícula, e

t é o tempo.

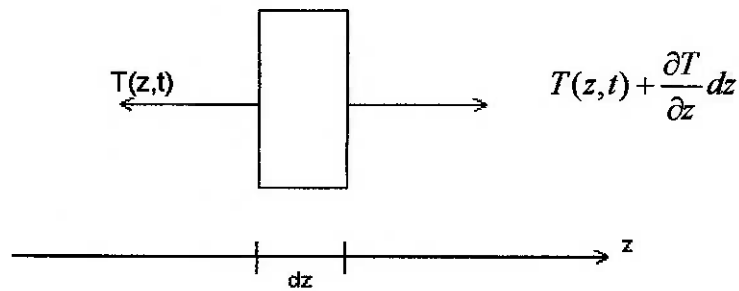


Fig. 13 - Volume elementar.

Sabe-se que a relação deformação-deslocamento é:

$$S_3 = \frac{\partial u_3}{\partial z} \quad (11)$$

Manipulando as equações (8), (9), (10) e (11), obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial^2 u_3}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (12)$$

que é a equação da onda,

onde, $c = \sqrt{\frac{C_{33}^E + \frac{e_{33}^2}{\epsilon_{33}^S}}{\rho}}$ é a velocidade de propagação em meios piezelétricos.

Para a solução da equação (12), considerando a solução do tipo:

$$u(z) = m \sin(kz) + n \cos(kz), \quad (13)$$

a velocidade da partícula:

$$v(z) = j\omega(m \sin(kz) + n \cos(kz)) \quad (14)$$

e as condições de contorno:

$$\begin{aligned} v(0) &= v_1 \\ v(l) &= -v_2 \end{aligned} \quad (15)$$

obtem-se, da primeira condição de contorno, que:

$$n = \frac{v_1}{j\omega} \quad (16)$$

e da segunda condição de contorno, que:

$$m = -\frac{1}{j\omega} \left(\frac{v_2 + v_1 \cos(kl)}{\sin(kl)} \right) \quad (17)$$

Portanto tem-se que:

$$\begin{aligned} u(z) &= \frac{1}{j\omega} \left[v_1 \cos(kz) - \frac{v_2 + v_1 \cos(kl)}{\sin(kl)} \sin(kz) \right] \\ S(z) &= \frac{1}{jc} \left[v_1 \sin(kz) + \frac{v_2 + v_1 \cos(kl)}{\sin(kl)} \cos(kz) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

Considerando que a cerâmica esteja em contato apenas com o ar, como indicado na Fig. 14, da equação constitutiva (9), isolando-se o campo elétrico obtém-se:

$$E = \frac{D_0}{\epsilon_{33}^s} - \frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^s} S \quad (19)$$

Sabe-se que:

$$\begin{aligned} V &= \int_0^l E(z) dz = \int_0^l \left(-\frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^s} S + \frac{D_0}{\epsilon_{33}^s} \right) dz = \int_0^l -\frac{e_{33}}{\epsilon_{33}^s} \frac{du}{dz} dz + \int_0^l \frac{D_0}{\epsilon_{33}^s} dz \\ V &= -\frac{e_{33}^2 D_0 2 \operatorname{tg}(kl/2)}{\epsilon_{33}^s (c_{33}^E \epsilon_{33}^s + e_{33}^2) k} + \frac{D_0 l}{\epsilon_{33}^s} \end{aligned} \quad (20)$$

Para um meio piezelétrico tem-se:

$$D_3(z, t) = D_0 e^{j\omega t} \quad (21)$$

A carga elétrica (q) pode ser calculada da seguinte forma:

$$q = \int_V \rho_{\text{elet}} dV = D_3 A,$$

onde A é a área da cerâmica.

A corrente elétrica pode ser calculada da seguinte forma:

$$i = \frac{dq}{dt} = j\omega D_0 e^{j\omega t} \quad (22)$$

$$I = j\omega D_0 A \quad (23)$$

A impedância elétrica para o caso de uma cerâmica em contato apenas com o ar pode ser calculada da seguinte forma $Z_{elet} = \frac{V}{I}$ e, portanto, das equações (20) e (23):

$$Z_{elet.} = \frac{1}{j\omega C_0} \left[1 - \frac{\kappa^2}{1 + \kappa^2} \frac{\tan \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} \right] \quad (24)$$

onde ω é a velocidade angular da onda,

$$C_0 = \frac{A \epsilon_{33}^s}{l} \text{ é a capacitância,}$$

$$\kappa^2 = \frac{e_{33}^2}{c_{33}^E \epsilon_{33}^s} \text{ é o fator de acoplamento eletromecânico,}$$

$$k = \frac{\omega}{c} \text{ é o número de onda.}$$

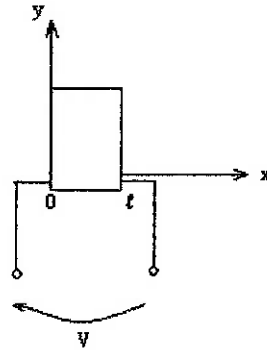


Fig. 14 – Cerâmica em contato apenas com o ar.

Considerando agora que a cerâmica troca energia com o meio externo como mostrado na Fig. 15, utilizando as equações constitutivas (8) e (9) e sabendo que

$$D_0 = \frac{I}{j\omega A} \text{ obtém-se:}$$

$$E(z) = \frac{I}{j\omega A \epsilon_{33}^s} + \frac{e_{33}}{j\epsilon_{33}^s c} \left[v_1 \sin(kz) + \frac{v_2 + v_1 \cos(kl)}{\sin(kl)} \cos(kz) \right] \quad (25)$$

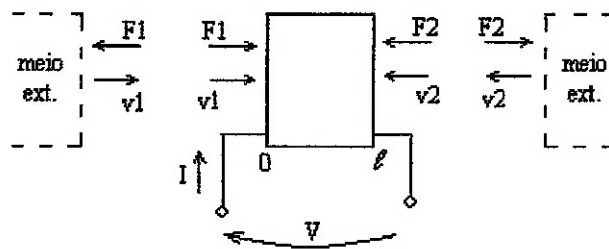


Fig. 15 – Cerâmica piezoelétrica em um meio material.

Substituindo $E(z)$ na equação (8) para $z = 0$, obtém-se:

$$F_1 = \frac{\rho c A}{j \tan(kl)} v_1 + \frac{\rho c A}{j \sin(kl)} v_2 + \frac{e_{33}}{j \omega \epsilon_{33}} I \quad (26)$$

onde,

$$Z = \rho c A \quad (27)$$

é a impedância acústica.

Da equação (8) em $z = l$, obtém-se:

$$F_2 = \frac{Z}{j \sin(kl)} v_1 + \frac{Z}{j \tan(kl)} v_2 + \frac{e_{33} I}{j \omega \epsilon_{33}} \quad (28)$$

$$V = \frac{e_{33}}{j \omega \epsilon_{33}} v_1 + \frac{e_{33}}{j \omega \epsilon_{33}} v_2 + \frac{I}{j \omega C_0} \quad (29)$$

Escolhendo como variáveis independentes as grandezas mecânicas em $z = l$ e das equações (26), (27) e (28):

$$F_1 = \cos(kl) F_2 - j Z \sin(kl) v_2 + \frac{e_{33}}{j \omega \epsilon_{33}} (1 - \cos(kl)) I \quad (30)$$

$$v_1 = \frac{j \sin(kl)}{Z} F_2 - \cos(kl) v_2 - \frac{e_{33} \sin(kl) I}{Z \omega \epsilon_{33}} \quad (31)$$

$$V = \frac{e_{33} \sin(kl)}{Z \omega \epsilon_{33}} F_2 + \frac{e_{33}}{j \omega \epsilon_{33}} (1 - \cos(kl)) v_2 + \frac{1}{j \omega} \left(\frac{1}{C_0} - \frac{e_{33}^2 \sin(kl)}{Z \omega \epsilon_{33} s^2} \right) I \quad (32)$$

Supondo que a porta 1 seja carregada com impedância acústica Z_B :

$$\begin{aligned} T &= \rho C v \\ F_1 &= -Z_B v_1 \end{aligned} \quad (33)$$

Substituindo nas equações (30) e (31):

$$I = A_{21}F_2 + A_{22}v_2 \quad (34)$$

Substituindo na equação (32):

$$V = A_{11}F_2 + A_{12}v_2 \quad (35)$$

Escolhendo como variáveis independentes as grandezas mecânicas da porta 2, tem-se

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

onde,

V é a tensão elétrica e

I é a corrente elétrica.

$$A_{11} = \frac{\varepsilon_{33}^s}{e_{33}C_0} \frac{(\cos kl + j\zeta \sin kl)}{(\cos kl - 1 + j\zeta \sin kl)} - \frac{e_{33}}{Z\omega\varepsilon_{33}^s} \frac{\sin kl}{(\cos kl - 1 + j\zeta \sin kl)} \quad (37)$$

$$A_{12} = \frac{e_{33}}{j\omega\varepsilon_{33}^s} \frac{(2\cos kl - 2 + j\zeta \sin kl)}{(\cos kl - 1 + j\zeta \sin kl)} - \frac{\varepsilon_{33}^s Z}{C_0 e_{33}} \frac{(\zeta \cos kl + j \sin kl)}{(\cos kl - 1 + j\zeta \sin kl)} \quad (38)$$

$$A_{21} = \frac{j\omega\varepsilon_{33}^s}{e_{33}} \frac{(\cos kl + j\zeta \sin kl)}{(\cos kl - 1 + j\zeta \sin kl)} \quad (39)$$

$$A_{22} = -\frac{j\omega\varepsilon_{33}^s Z}{e_{33}} \frac{(\zeta \cos kl + j \sin kl)}{(\cos kl - 1 + j\zeta \sin kl)} \quad (40)$$

$$\zeta = \frac{Z_B}{Z} \quad (41)$$

Colocando uma camada de matching entre a cerâmica e o meio externo, como mostrado na Fig. 16, demonstra-se que as relações entre forças e velocidades nas faces da camada m são:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{Z_m}{j \tan k_m l_m} v_1 + \frac{Z_m}{j \sin k_m l_m} v_2 \\ F_2 = \frac{Z_m}{j \sin k_m l_m} v_1 + \frac{Z_m}{j \tan k_m l_m} v_2 \end{cases} \quad (42)$$

onde Z_m é a impedância acústica da camada de matching,

k_m é o número de onda da camada de matching e

l_m é a Largura da camada de matching M.

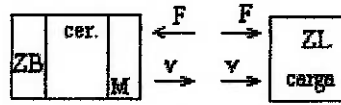


Fig. 16 - Transdutor piezelétrico com camadas de backing e matching.

Na forma matricial, a equação (42) fica:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_m l_m & -jZ_m \sin k_m l_m \\ \frac{j \sin k_m l_m}{Z_m} & -\cos k_m l_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (43)$$

onde,

$$\begin{bmatrix} \cos k_m l_m & -jZ_m \sin k_m l_m \\ \frac{j \sin k_m l_m}{Z_m} & -\cos k_m l_m \end{bmatrix} = [M_n] \text{ ou } [B_m] \quad (44)$$

Em geral, um transdutor pode ser construído de várias camadas, como é ilustrado na Fig. 17.

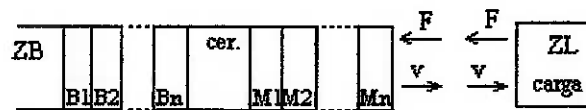


Fig. 17 – Transdutor piezelétrico com várias camadas.

Para n camadas de casamento de impedância, tem-se

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & -A_{12} \\ A_{21} & -A_{22} \end{bmatrix} [M_1][M_2] \cdots [M_n] \begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} \quad (45)$$

que pode ser escrito como

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ v \end{bmatrix} \quad (46)$$

Portanto, a impedância elétrica para uma cerâmica com camada de backing e de matching é dada por:

$$Z_{elet} = \frac{V}{I} = \frac{AZ_L + B}{CZ_L + D} \quad (47)$$

Considerando um transdutor em emissão, conforme mostrado na Fig. 18, pode ser definida uma função de transferência em emissão, dada pela equação (48). Na Fig. 18, V_E é um gerador de tensão e R_T é a resistência interna desse gerador.

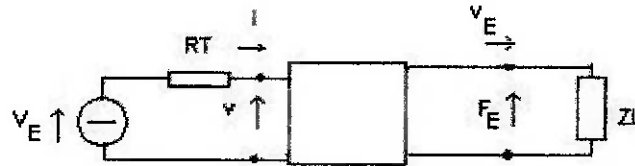


Fig. 18 – Transdutor em Emissão.

$$FTE = \frac{F_E}{V_E} \quad (48)$$

Pelo equilíbrio da malha tem-se que:

$$V = V_E - R_T I \quad (49)$$

Pela equação (46):

$$V = AF_E + Bv_E \Rightarrow \frac{V}{F_E} = A + \frac{B}{\frac{F_E}{V_E}} = A + \frac{B}{Z_L} \quad (50)$$

A partir das equações (48), (49) e (50), obtém-se a função de transferência em emissão (FTE):

$$FTE(f) = \frac{Z_L}{AZ_L + B + R_E(CZ_L + D)} \quad (51)$$

O transdutor ao converter um sinal acústico em sinal elétrico trabalha no modo de recepção, como esquematizado na Fig. 19, onde R_R representa a resistência interna do instrumento de medição do sinal elétrico.

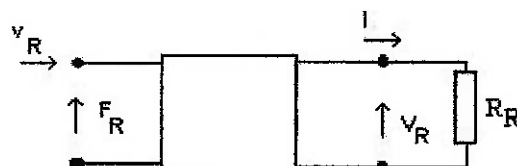


Fig. 19 – Transdutor em Recepção.

Para este modo de recepção tem-se que:

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_R \\ v_R \end{bmatrix} \quad (52)$$

A Função de Transferência em Recepção é definida por:

$$FTR = \frac{V_R}{F_R} \quad (53)$$

A partir da equação (52), tem-se que:

$$F_R = DV_R + BI \Rightarrow \frac{F_R}{V_R} = D + \frac{B}{\frac{V_R}{I}} = \frac{DR_R + B}{R_R} \quad (54)$$

A partir das equações (53) e (54), obtém-se a Função de Transferência em Recepção (FTR) é:

$$FTR = \frac{R_R}{DR_R + B} \quad (55)$$

Pode-se também definir a Função de Transferência em Emissão e Recepção (FTER) que é a relação entre o sinal elétrico de saída gerado por um sinal acústico e o sinal elétrico de entrada responsável por gerar um sinal acústico:

$$FTER = \frac{V_R}{V_E} = \frac{F_E}{V_E} \frac{F_R}{F_E} \frac{V_R}{F_R} \quad (56)$$

onde V_R é o sinal elétrico de saída e V_E é o sinal elétrico de entrada.

Portanto, a Função de Transferência em Emissão e Recepção (FTER) é dada por:

$$FTER(f) = \frac{Z_L}{AZ_L + B + R_E(CZ_L + D)} \frac{2R_R}{AZ_L + B + R_R(CZ_L + D)} \quad (57)$$

A partir das funções de transferência, em função da frequência, obtêm-se as respostas impulsivas, em função do tempo, através da Transformada Inversa de Fourier.

3.2 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos reduz as equações diferenciais parciais eletromecânicas para sistemas de equações diferenciais ordinárias com domínio no tempo. Isto é feito utilizando alguns princípios tais como trabalho virtual, método de

Galerkin e conservação de energia. O resultado é que as derivadas nas equações diferenciais parciais são reduzidas a uma soma de sistemas de equações lineares algébricas nos campos de valores desconhecidos dos nós da discretização do elemento finito. Os elementos utilizados nesse trabalho foram quadriláteros de quatro nós. Foram utilizados também 20 elementos por comprimento de onda.

Segundo (Galdos et al., 1990), para um problema bidimensional no plano xy , as equações de propagação de onda são dadas pelas seguintes equações diferenciais:

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = f_x + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right), \quad (58)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = f_y + (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right), \quad (59)$$

onde u_x e u_y são os deslocamentos de um ponto no material nas direções x e y , respectivamente, f_x e f_y são as forças externas aplicadas no ponto e λ e μ são as constantes de Lamé.

Utilizando o operador nabla $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$, as equações (58) e (59) podem ser escritas da forma:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla \times \nabla \times \mathbf{U} + (\lambda + 2\mu) \Delta \mathbf{U} + \mathbf{F}. \quad (60)$$

Usando cálculo variacional, a equação (60) é a equação de Euler do funcional $I(\mathbf{U})$ definido por:

$$I(\mathbf{U}) = \iint \left(\frac{1}{2} (\lambda + \mu) (\nabla \times \mathbf{U})^2 + \frac{1}{2} (\lambda + 2\mu) [(\nabla u_x)^2 + (\nabla u_y)^2] - \frac{1}{2} \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}^2}{\partial t^2} + \mathbf{F} \mathbf{U} \right) dx dy \quad (61)$$

Os deslocamentos u_x e u_y podem ser aproximados por:

$$u_x = \sum N_\alpha U_{x\alpha}, \quad (62)$$

$$u_y = \sum N_\alpha U_{y\alpha}, \quad (63)$$

onde N_α é uma função interpoladora de x e y , e $U_{x\alpha}$ e $U_{y\alpha}$ são valores nodais de u_x e u_y , respectivamente. Derivando $I(\mathbf{U})$ em relação a $U_{x\alpha}$ e $U_{y\alpha}$ o seguinte sistema de equações é obtido:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}_\alpha + \mathbf{K} \mathbf{U}_\alpha + \mathbf{F}_\alpha = 0, \quad (64)$$

onde $\mathbf{K}$ e $\mathbf{M}$ são as matrizes de rigidez e massa, respectivamente, $\mathbf{F}_\alpha$ é o vetor de carga, $\mathbf{U}_\alpha$ é um vetor contendo $U_{x\alpha}$ e $U_{y\alpha}$.

A equação (64) é geralmente encontrada na solução de problemas dinâmicos e mostra que a equação da propagação acústica pode ser resolvida utilizando o mesmo método de outros problemas dinâmicos.

4 SIMULAÇÃO

Abaixo estão descritos as simulações realizadas no software Ansys para o transdutor monoelemento e duplo-elemento.

4.1 Monoelemento

Com o software Ansys, foram feitas simulações da propagação da onda acústica através da interface definida entre os meios acrílico e alumínio. A interface foi inclinada em vários ângulos, para calcular o coeficiente de transmissão em potência. A Fig. 20 ilustra o modelo simulado.

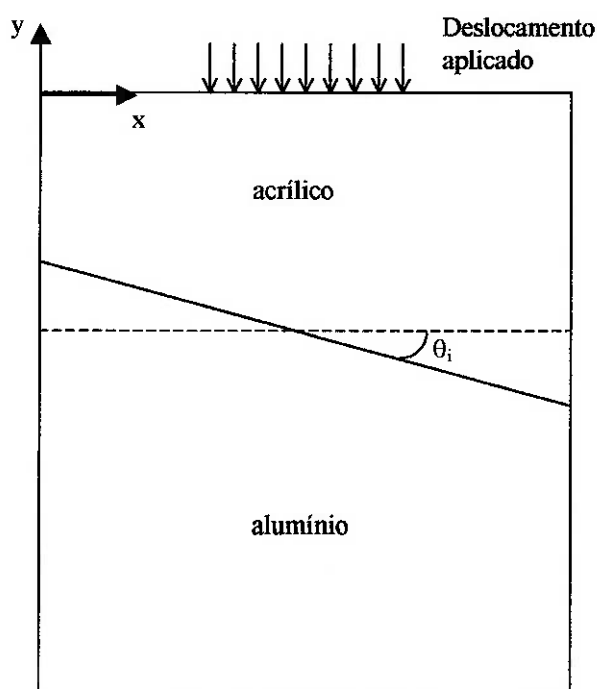


Fig. 20 – Geometria utilizada na simulação.

Para simular o transdutor, foi aplicado um deslocamento com a forma de onda mostrada na Fig. 21.

A discretização da malha foi de $\lambda/20$, fazendo com que o tamanho do elemento fosse de 135 μm para o acrílico e de 350 μm para o alumínio. Na interface,

foi preciso fazer uma transição, para que todos os nós ficassem conectados, conforme Fig. 22.

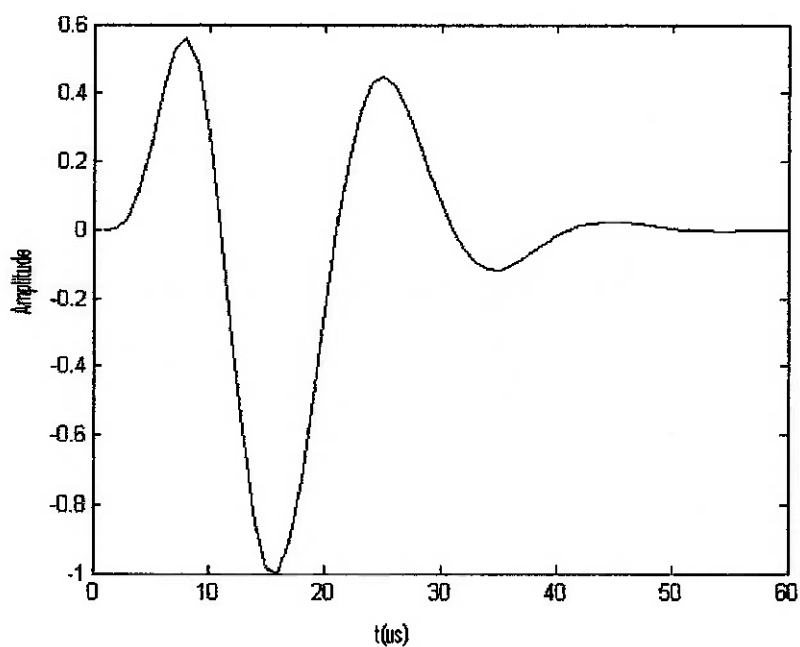


Fig. 21 – Forma de onda do deslocamento aplicado.

As propriedades utilizadas no alumínio foram velocidade de 6200 m/s e densidade de 2800 kg/m^3 e as propriedades utilizadas no acrílico foram velocidade de 2700 m/s e densidade de 1180 kg/m^3 .

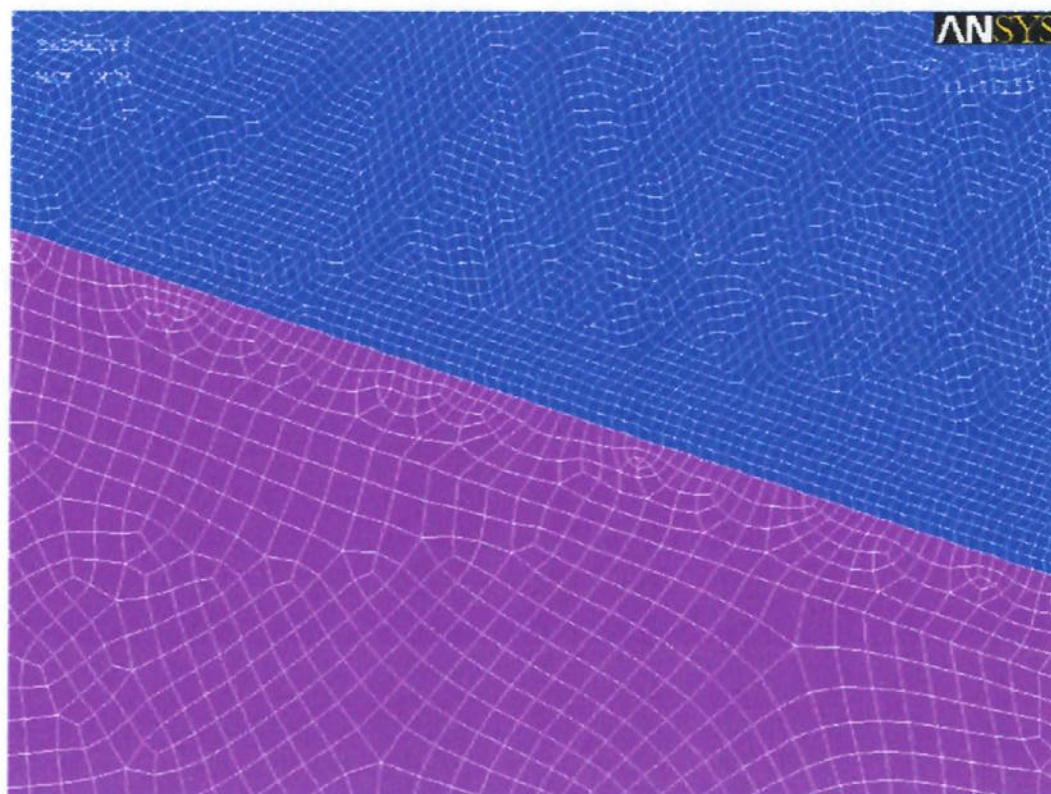


Fig. 22 – Malha utilizada.

4.2 Duplo-Elemento

Foi feita uma simulação com um modelo utilizando dois transdutores inclinados, um de transmissão e outro de recepção, da propagação da onda acústica do acrílico para o alumínio, através de uma interface. A Fig. 23 mostra um esquema do modelo utilizado.

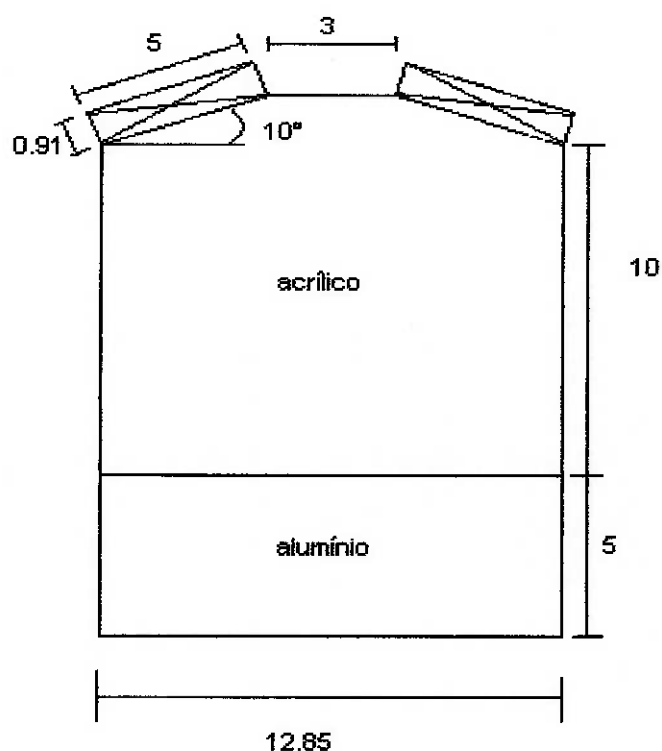


Fig. 23 – Esquema do modelo do transdutor duplo-elemento.

A malha utilizada no Ansys é mostrada na Fig. 24 e a sua discretização foi de $\lambda/20$. E o sinal de tensão elétrica aplicada no transdutor de transmissão é mostrado na Fig. 25. As propriedades utilizadas no alumínio foram velocidade de 6200 m/s e densidade de 2800 kg/m³ e as propriedades utilizadas no acrílico foram velocidade de 2700 m/s e densidade de 1180 kg/m³. As constantes piezelétricas utilizadas para a cerâmica foram $e_{31} = -5.4$, $e_{33} = 15.8$ e $e_{15} = 12.3$.

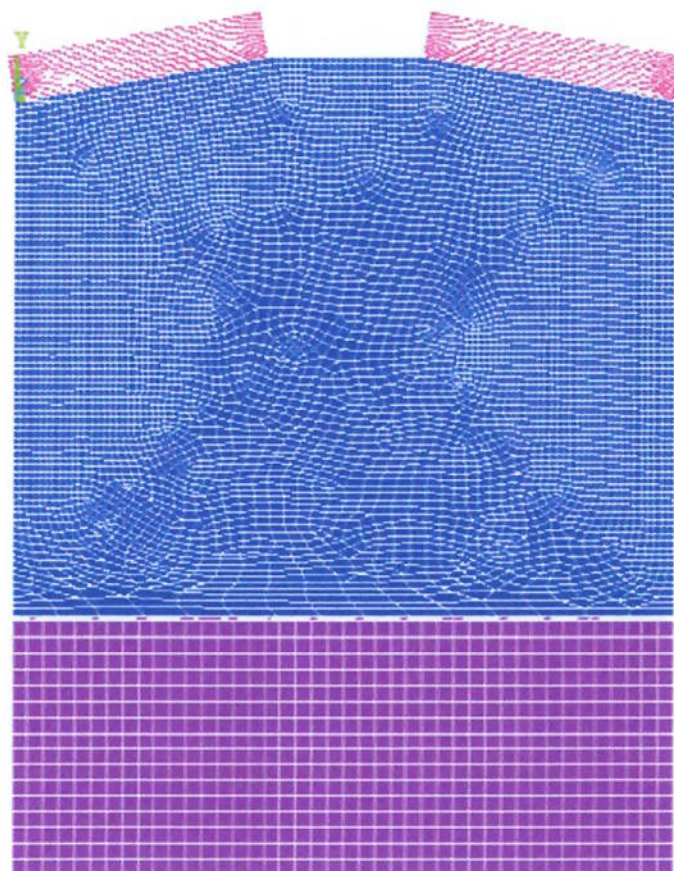


Fig. 24 – Malha utilizada no Ansys.

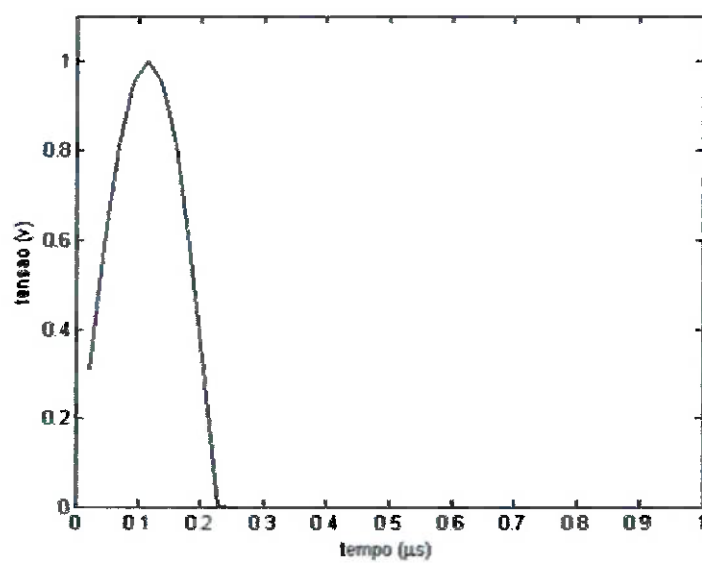


Fig. 25 – Tensão aplicada no transdutor de transmissão.

5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o método de elementos finitos para o transdutor monoelemento e duplo-elemento.

Para o transdutor monoelemento foram realizadas simulações da propagação da onda acústica através da interface a fim de verificar a conversão de modo. Para o transdutor duplo-elemento foram realizadas simulações de propagação de onda para se determinar as dimensões do transdutor e o ângulo de inclinação das cerâmicas piezelétricas, a fim de garantir a detecção de falhas a uma profundidade de no máximo 5 mm.

5.1 Transdutor monoelemento

Foram feitas simulações com inclinações da interface de 10° , 20° , 25° , 30° , 40° e 50° .

Para se obter o deslocamento e a tensão na direção y da onda incidente, foi utilizado o ponto da malha, indicado na Fig. 26.

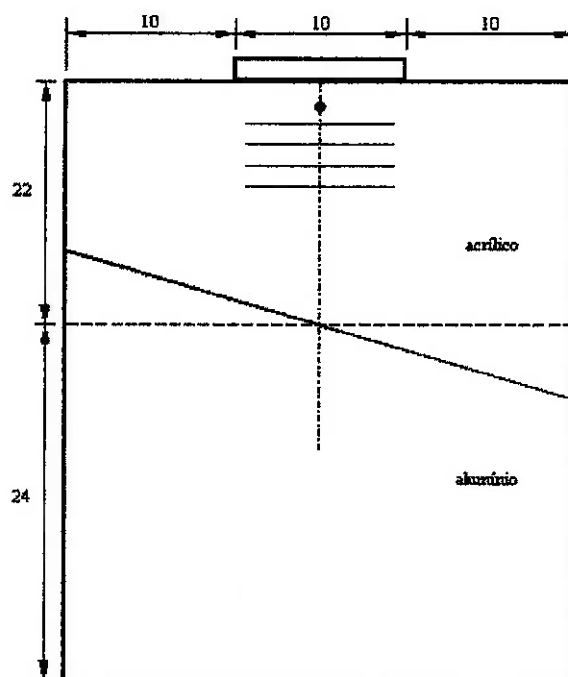


Fig. 26 – Localização do ponto utilizado para a onda incidente.

Para se obter os deslocamentos nas direções x e y, tensões nas direções x e y e tensão de cisalhamento, da onda transmitida, foi utilizado o ponto da malha, indicado na Fig. 27.

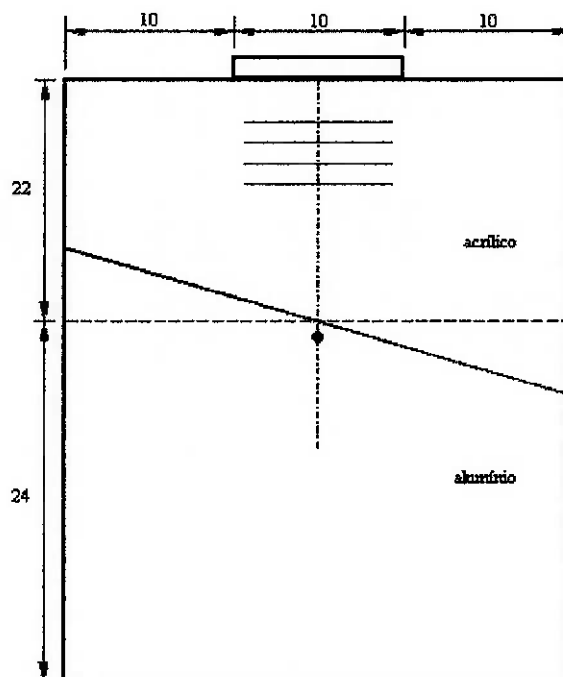


Fig. 27 – Localização do ponto utilizado para a onda transmitida.

Para estes ângulos de inclinação, para a onda incidente, foram obtidas formas de onda do deslocamento na direção y e da tensão na direção y, conforme a Fig. 28 e a Fig. 29 respectivamente.

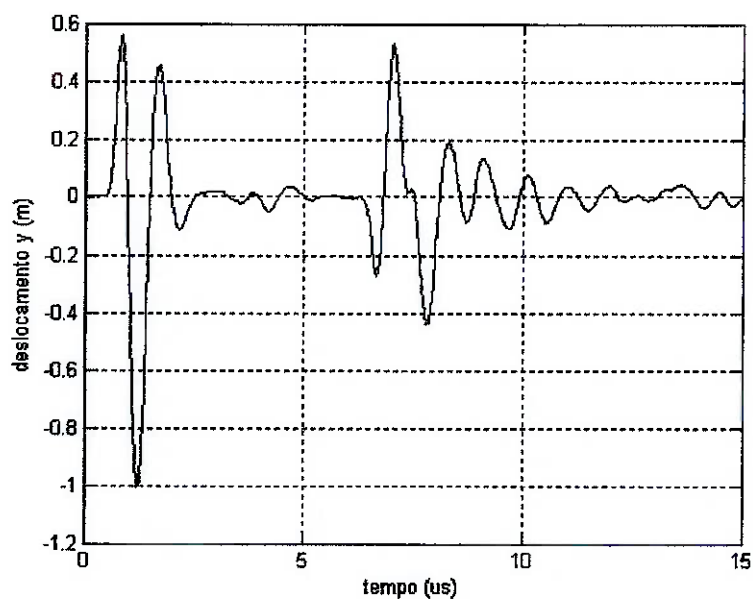


Fig. 28 – Deslocamento na direção y da onda incidente.

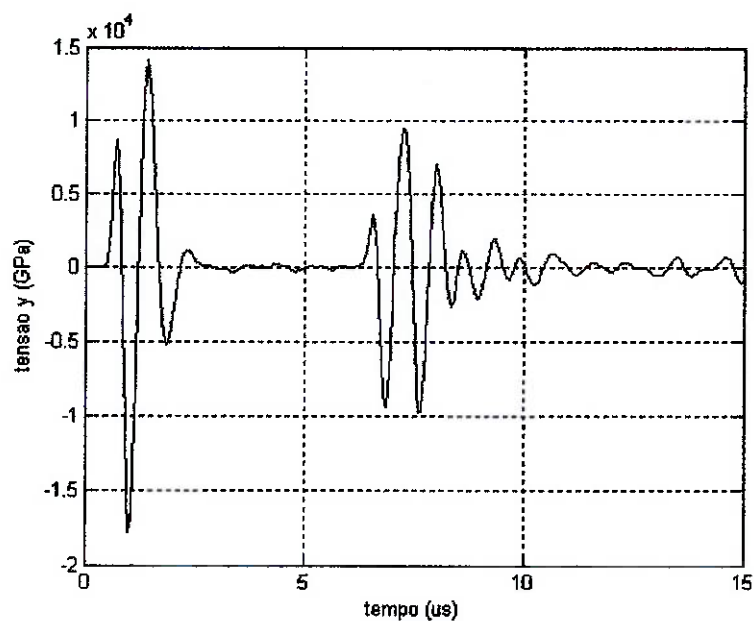


Fig. 29 - Tensão na direção y da onda incidente.

Para uma inclinação de 10° , para a onda transmitida, foram obtidas as seguintes formas de onda do deslocamento nas direções x e y , das tensões nas direções x e y , e da tensão de cisalhamento, conforme Fig.s 30 a 34.

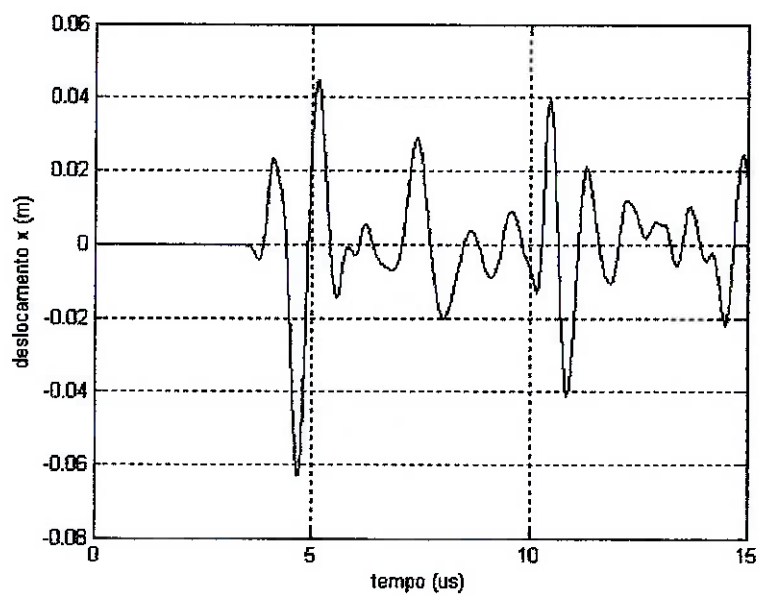


Fig. 30 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 10° .

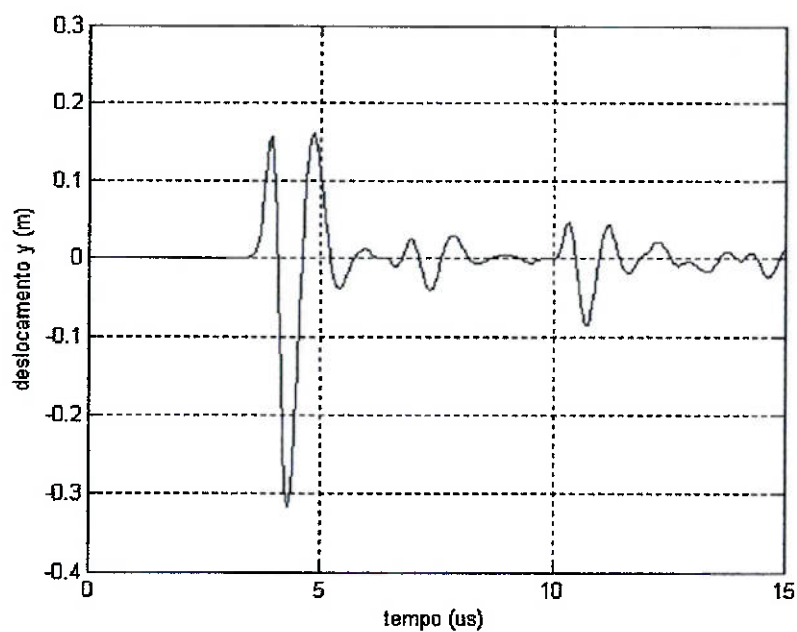


Fig. 31 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 10° .

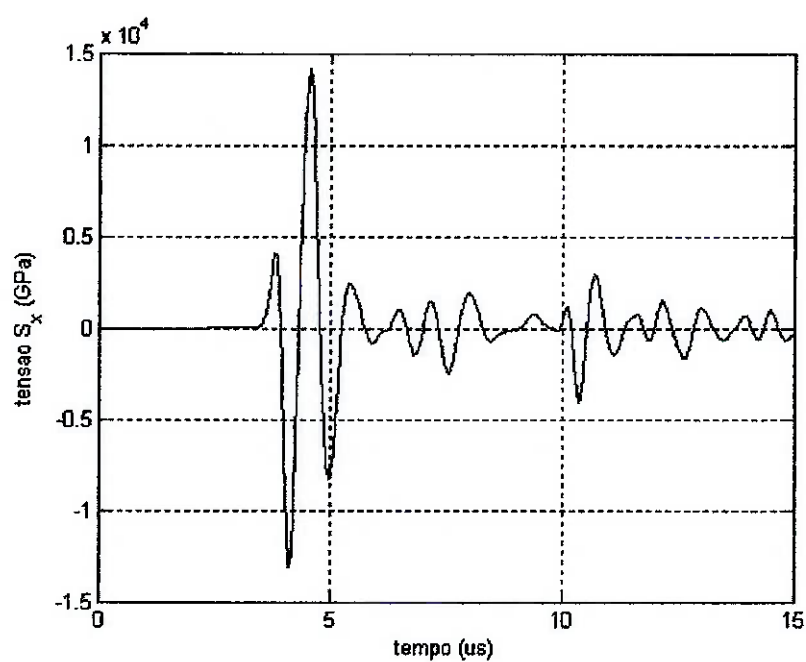


Fig. 32 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 10° .

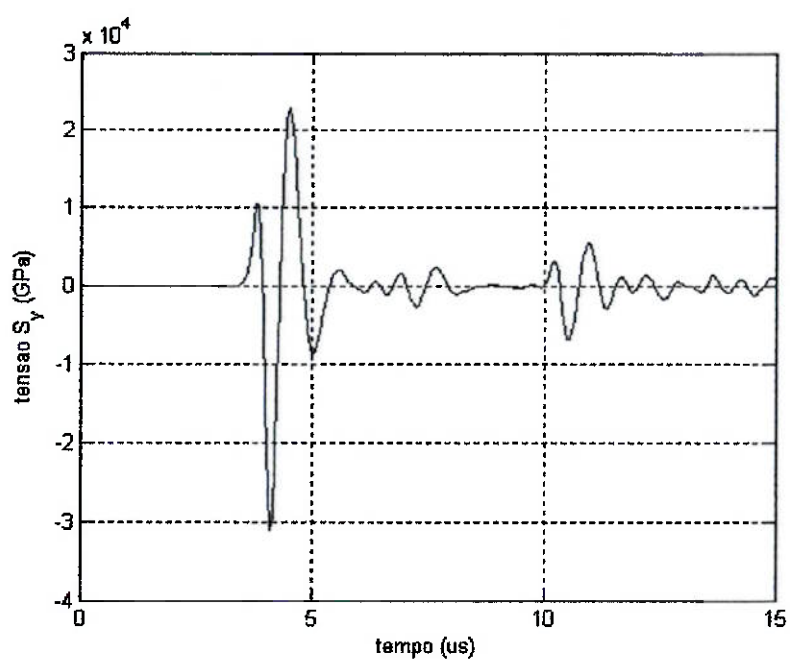


Fig. 33 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 10° .

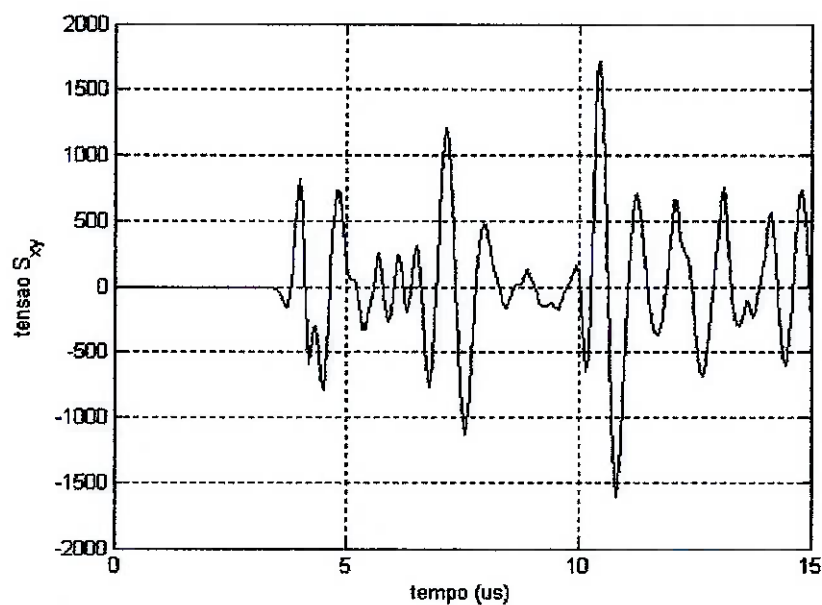


Fig. 34 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 10° .

Para uma inclinação de 20° , para a onda transmitida, foram obtidas as seguintes formas de onda do deslocamento nas direções x e y, das tensões nas direções x e y, e da tensão de cisalhamento, conforme Figs 35 a 39.

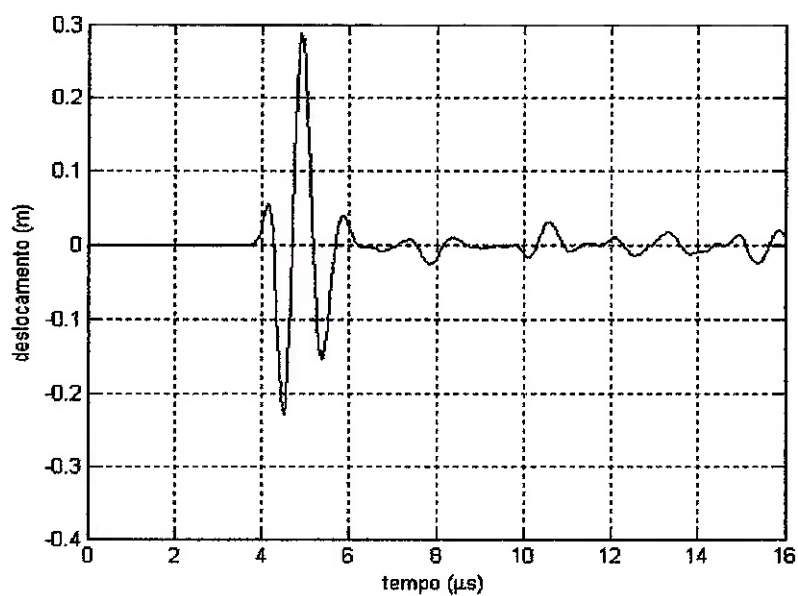


Fig. 35 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 20° .

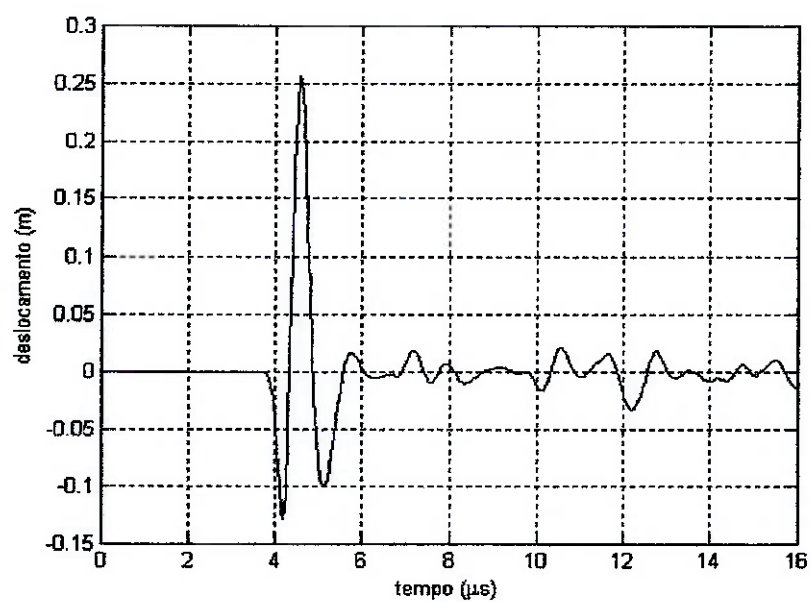


Fig. 36 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 20°.

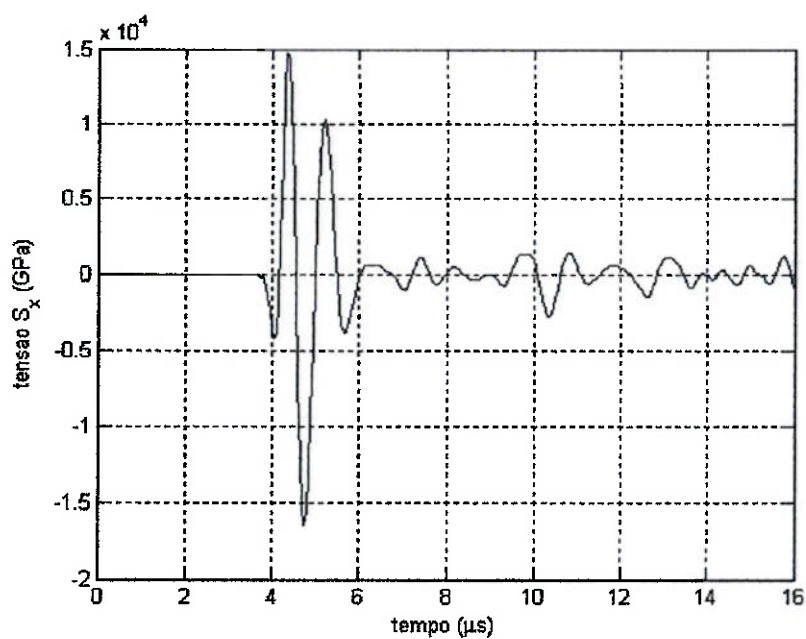


Fig. 37 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 20°.

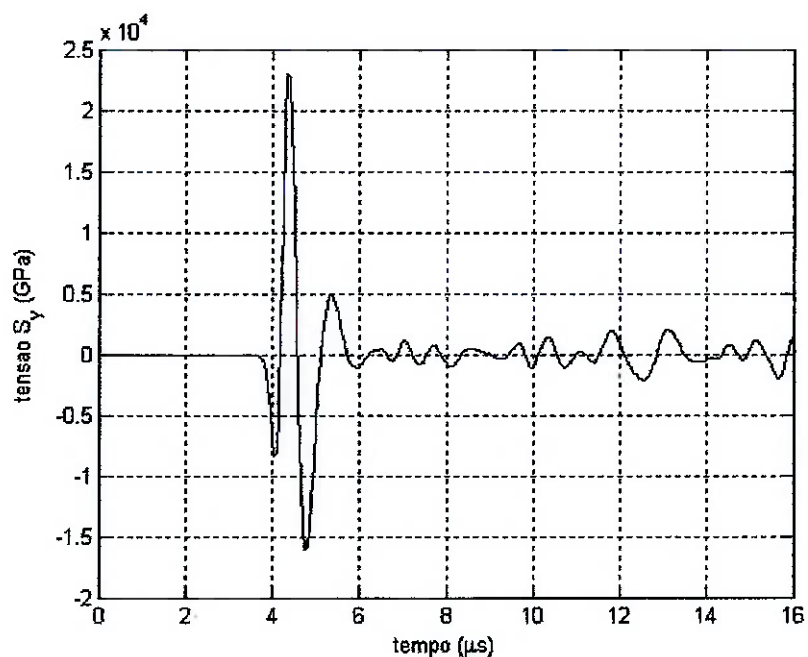


Fig. 38 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 20°.

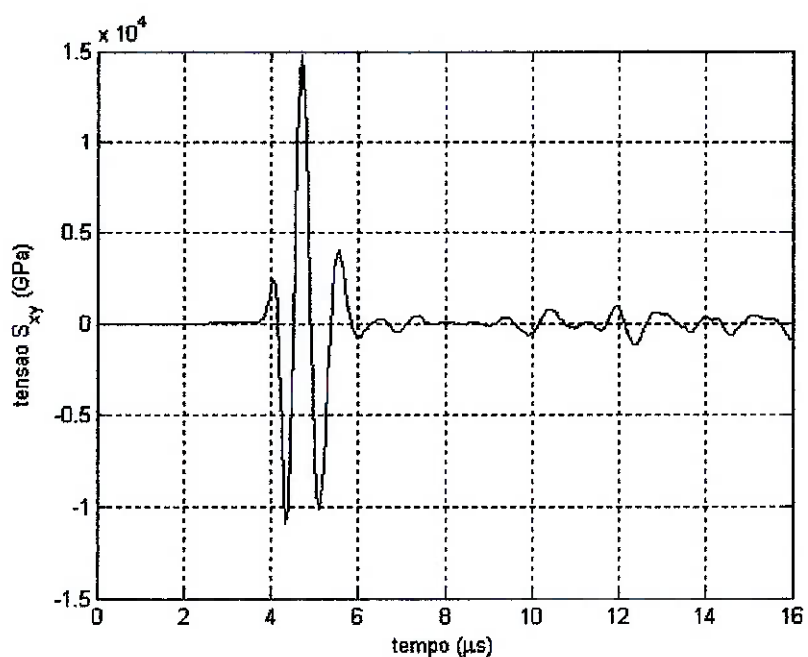


Fig. 39 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 20°.

Para uma inclinação de 25°, para a onda transmitida, foram obtidas as seguintes formas de onda do deslocamento nas direções x e y, das tensões nas direções x e y, e da tensão de cisalhamento, conforme Figs 40 a 44. Pela Fig. 9,

observa-se que para ângulos próximos a este ou maiores, as ondas são de cisalhamento devido a conversão de modo, e também que este é um ângulo crítico.

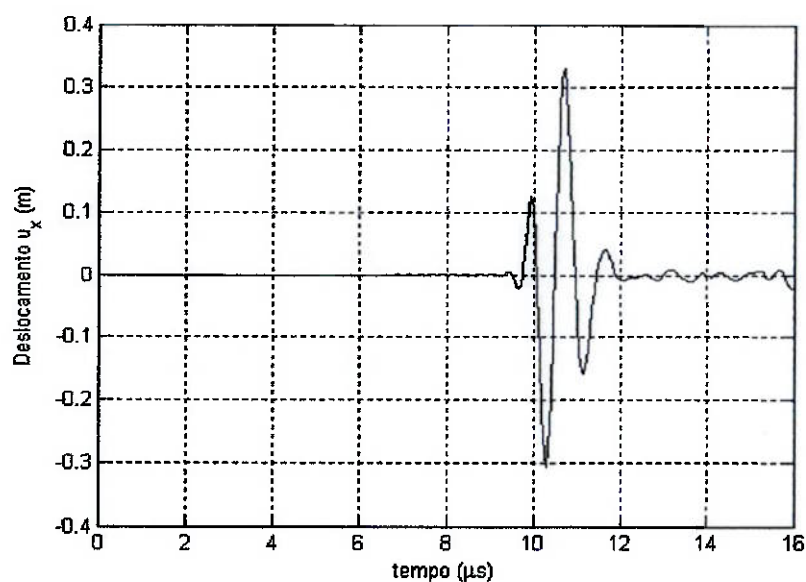


Fig. 40 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 25°.

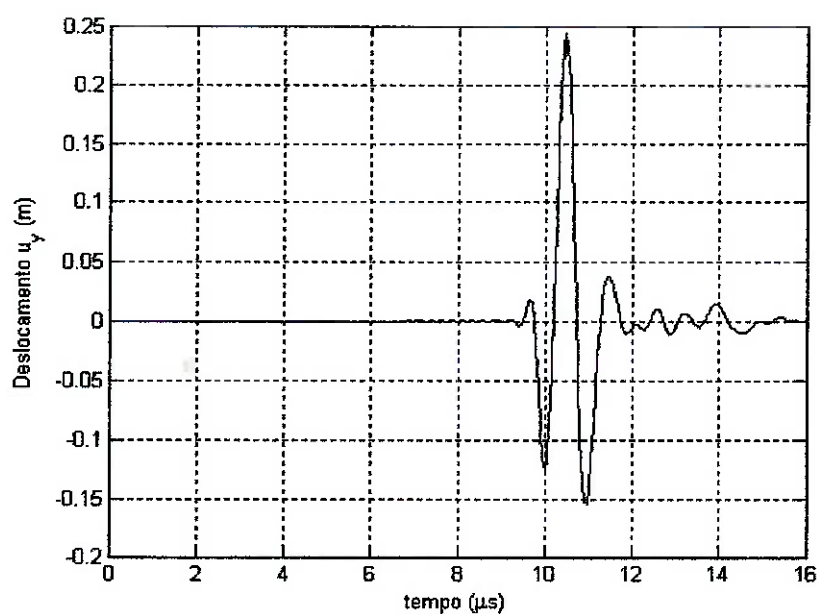


Fig. 41 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 25°.

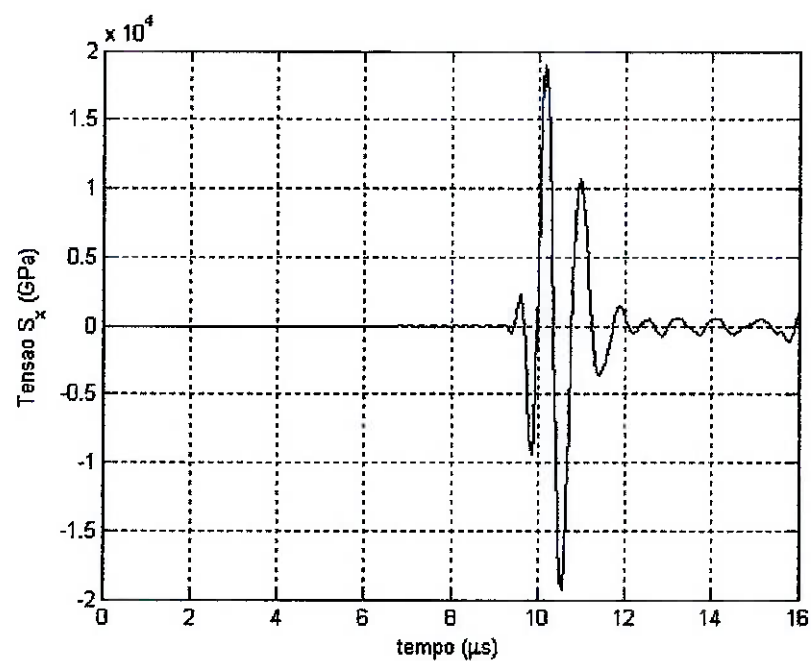


Fig. 42 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 25° .

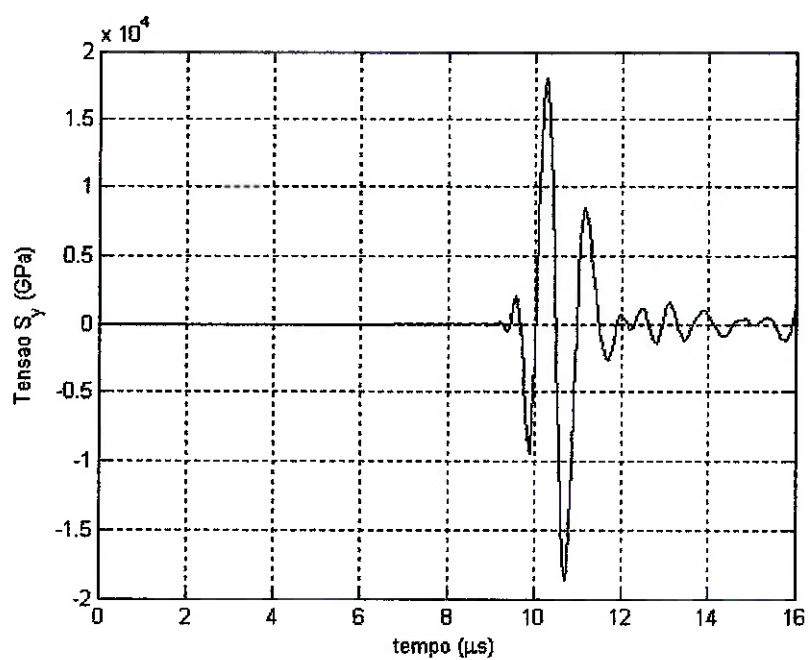


Fig. 43 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 25° .

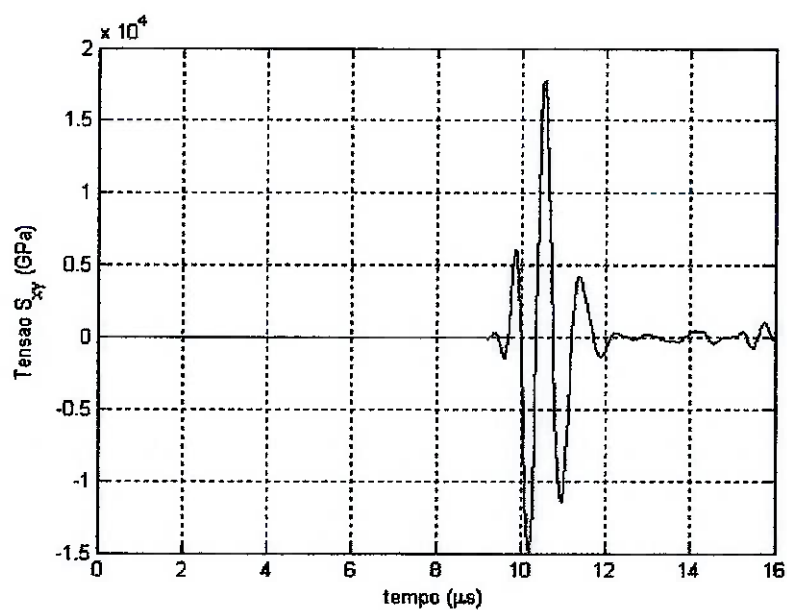


Fig. 44 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 25°.

Para uma inclinação de 30°, para a onda transmitida, foram obtidas as seguintes formas de onda do deslocamento nas direções x e y, das tensões nas direções x e y, e da tensão de cisalhamento, conforme Fig.s 45 a 49.

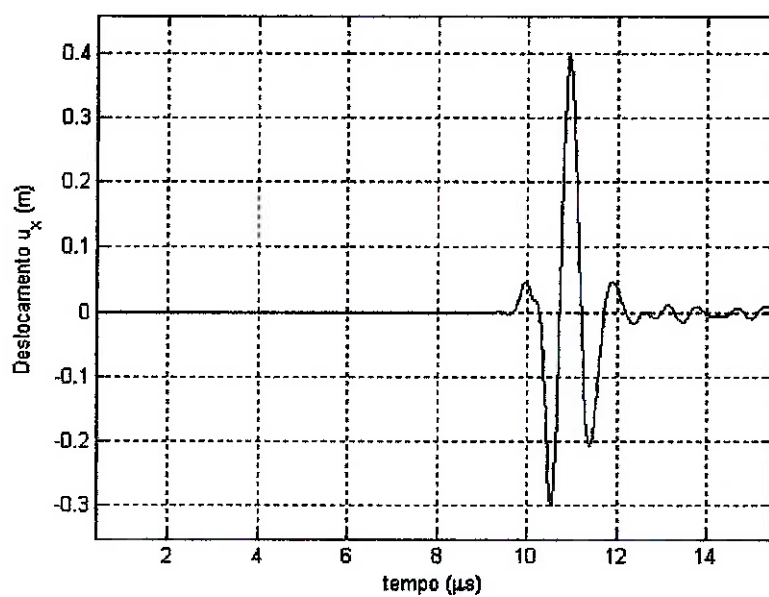


Fig. 45 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 30°.

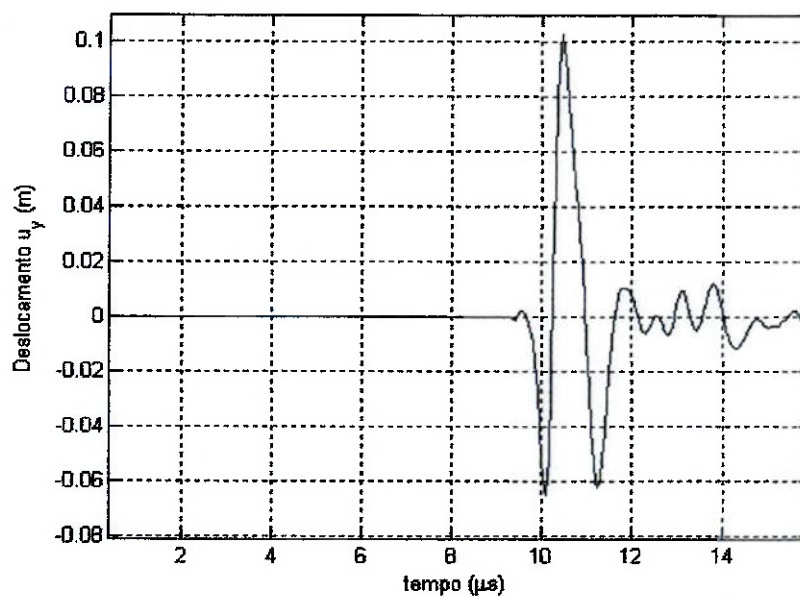


Fig. 46 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 30° .

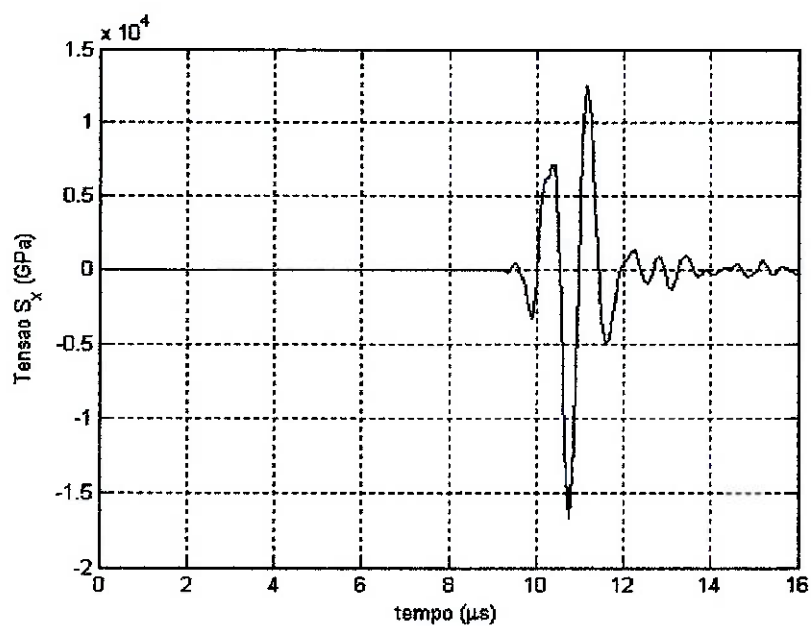


Fig. 47 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 30° .

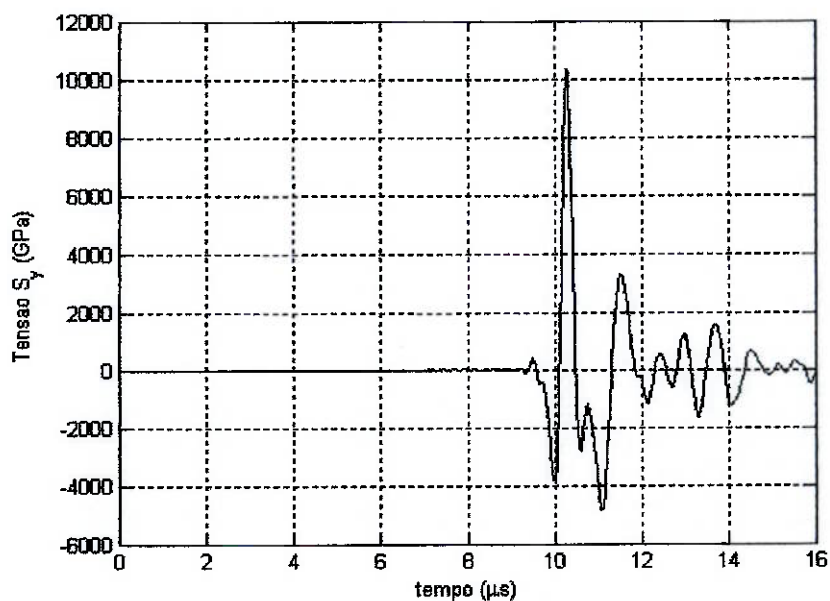


Fig. 48 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 30°.

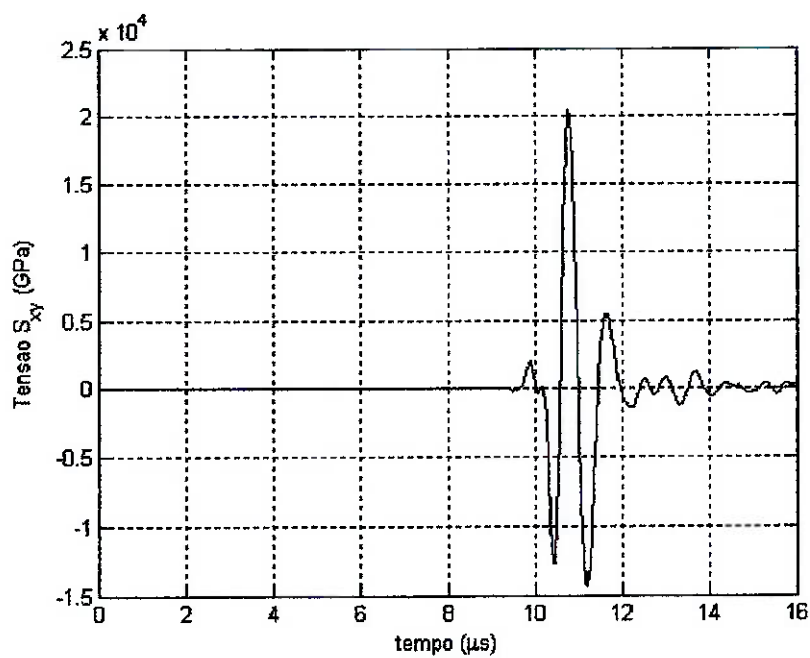


Fig. 49 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 30°.

Para uma inclinação de 40°, para a onda transmitida, foram obtidas as seguintes formas de onda do deslocamento nas direções x e y, das tensões nas direções x e y, e da tensão de cisalhamento, conforme Fig.s 50 a 54.

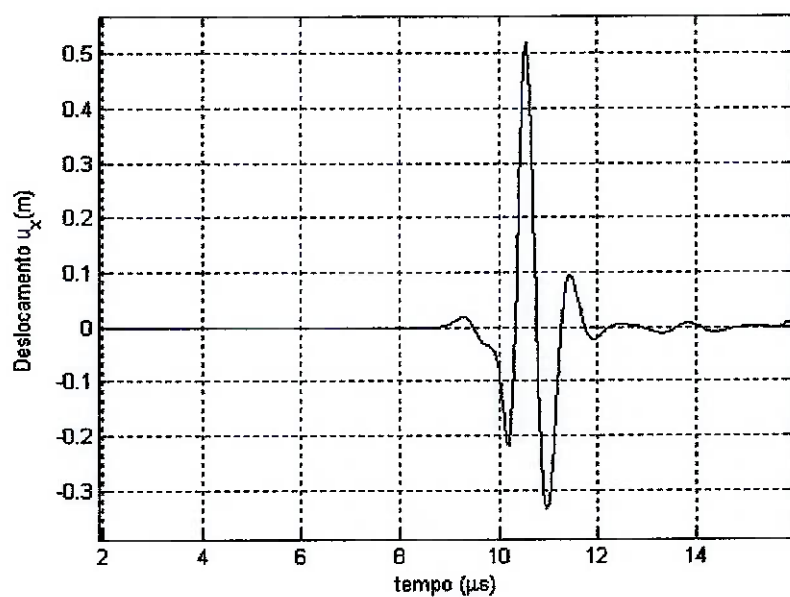


Fig. 50 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 40°.

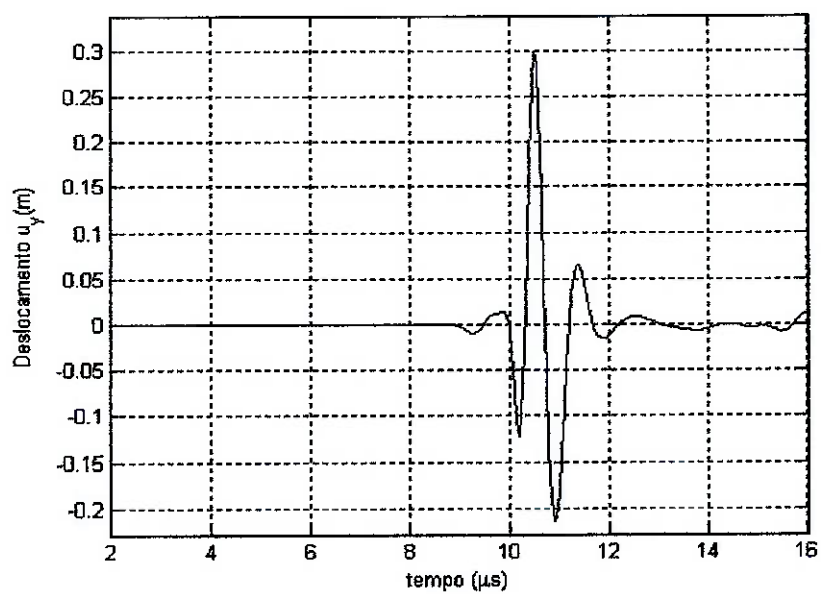


Fig. 51 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 40°.

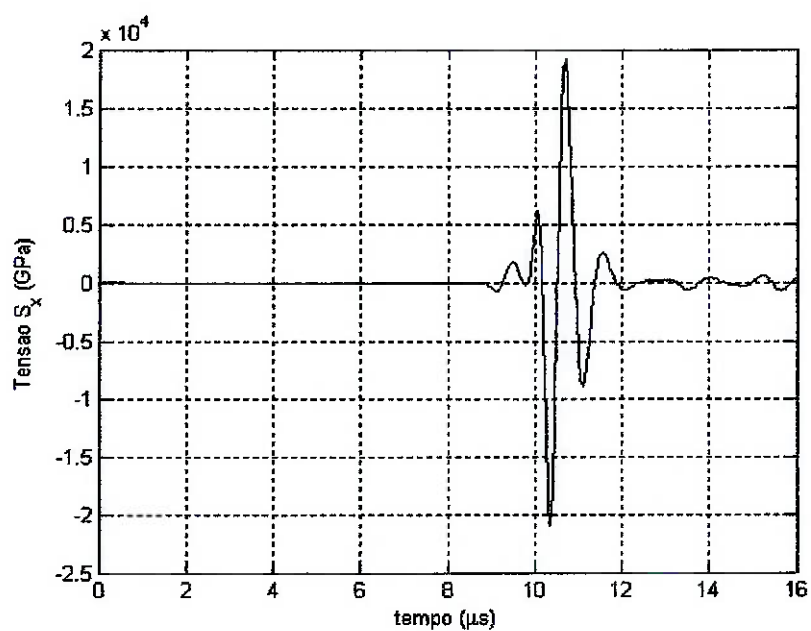


Fig. 52 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 40° .

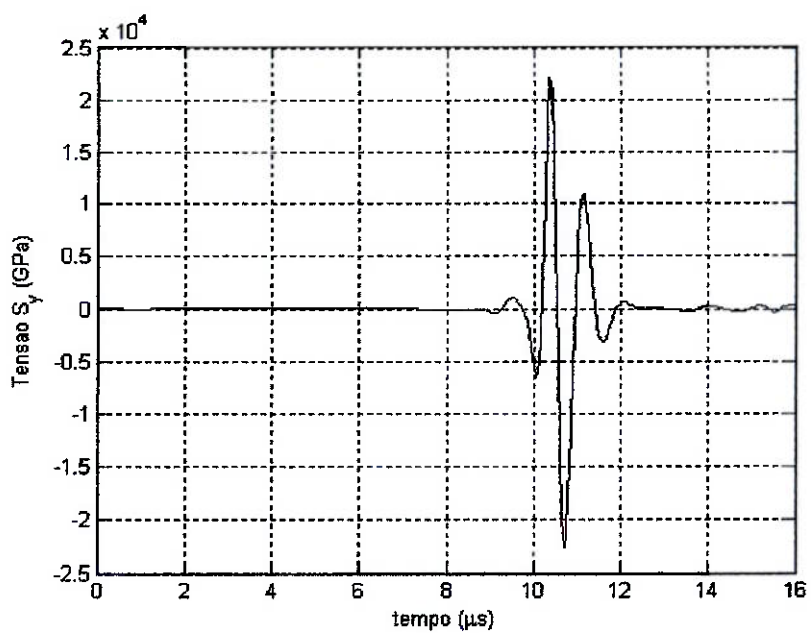


Fig. 53 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 40° .

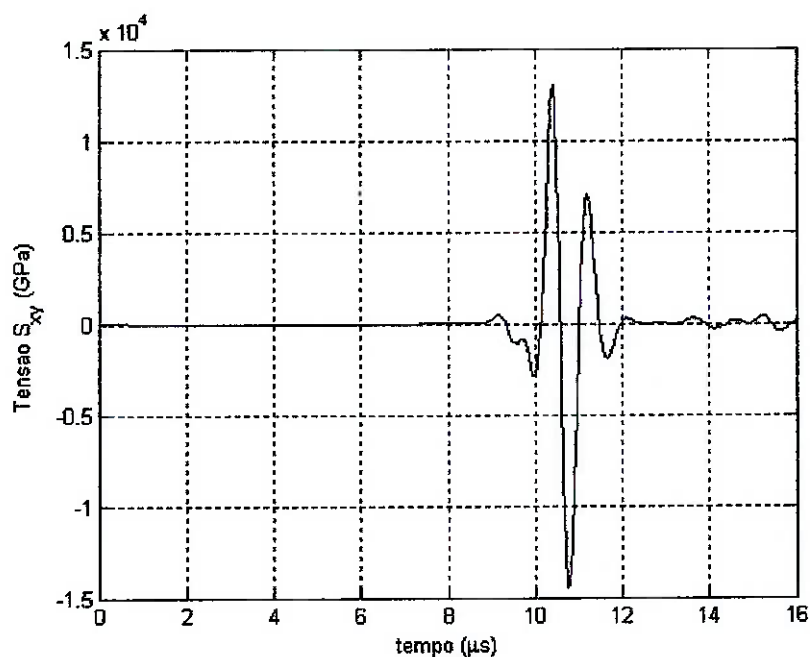


Fig. 54 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 40°.

Para uma inclinação de 50°, para a onda transmitida, foram obtidas as seguintes formas de onda do deslocamento nas direções x e y, das tensões nas direções x e y, e da tensão de cisalhamento, conforme Fig.s 55 a 59.

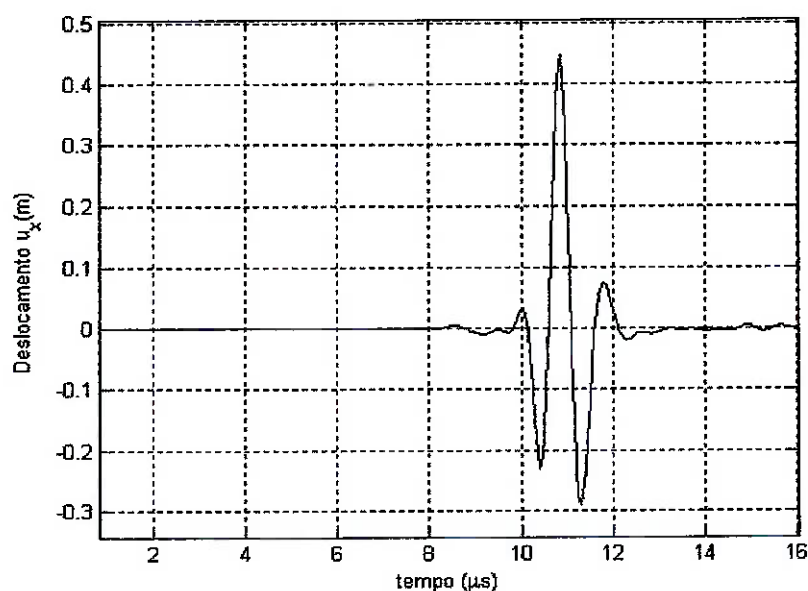


Fig. 55 – Deslocamento na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 50°.

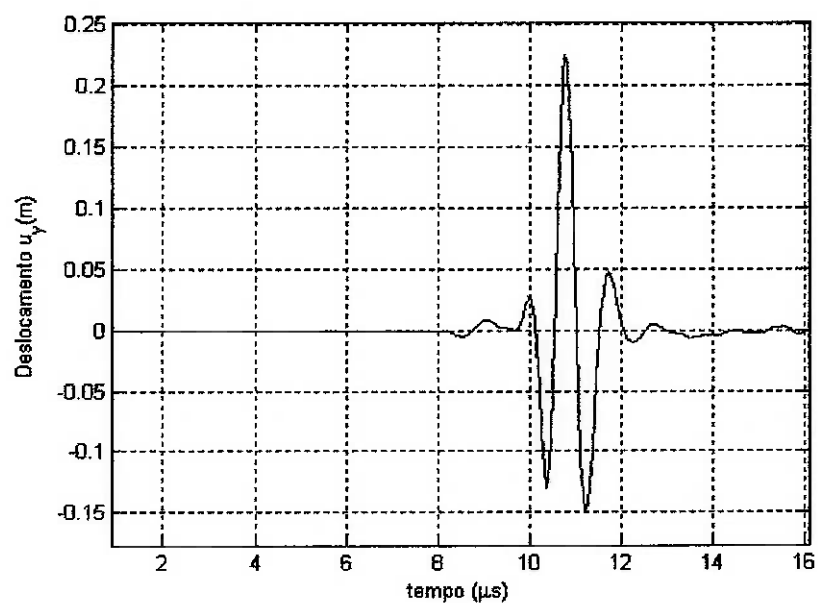


Fig. 56 - Deslocamento na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 50° .

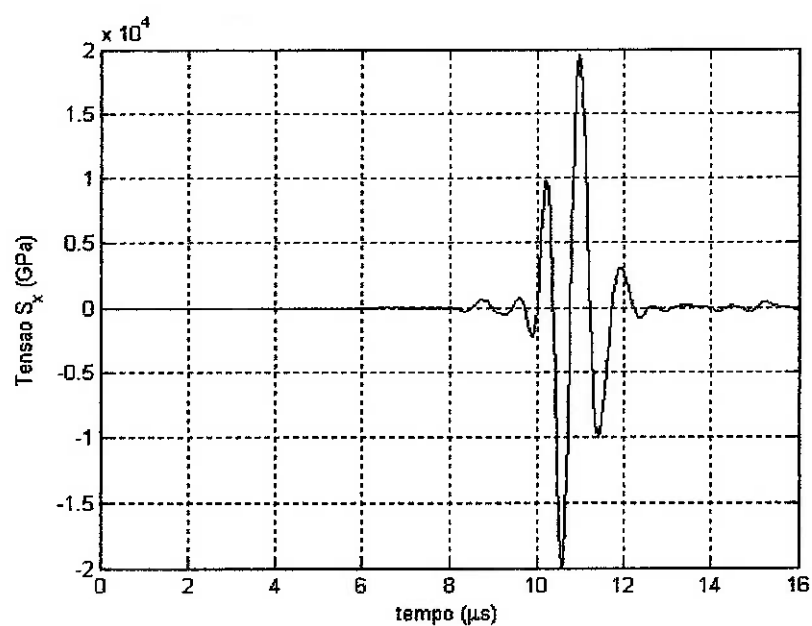


Fig. 57 - Tensão na direção x da onda transmitida para uma inclinação de 50° .

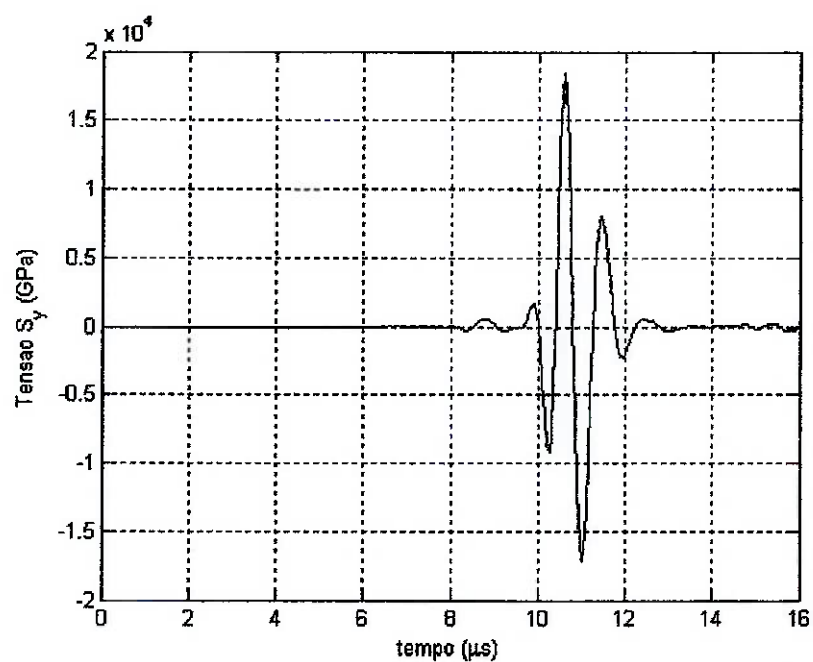


Fig. 58 - Tensão na direção y da onda transmitida para uma inclinação de 50° .

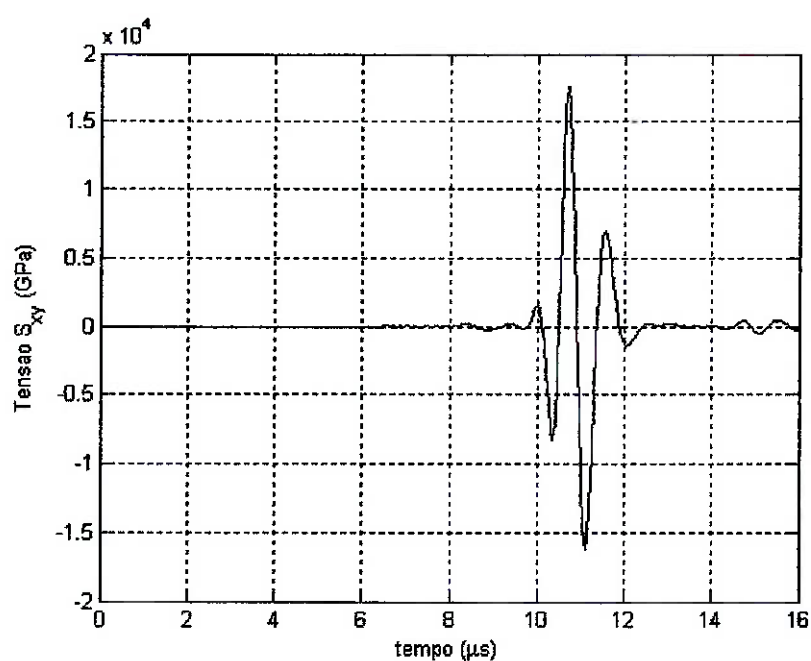


Fig. 59 - Tensão de cisalhamento da onda transmitida para uma inclinação de 50° .

Com esses resultados, foi calculado o valor do coeficiente de transmissão em potência. Para o cálculo das energias incidentes e transmitidas, foi usada a seguinte formulação.

$$E = \int \sigma_{\theta} \frac{du_{\theta}}{dt} dt = \sum \sigma_{\theta} du_{\theta}, \quad (65)$$

onde σ_{θ} e u_{θ} são a tensão e o deslocamento, respectivamente, na direção de propagação da onda.

O valor de σ_{θ} foi obtido usando o círculo de Mohr, segundo as equações (66), para onda longitudinal, e (67), para onda shear, a seguir.

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \quad (66)$$

$$\tau_{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\theta - \tau_{xy}\cos 2\theta \quad (67)$$

As Fig.s 60 e 61 a seguir mostram a comparação dos valores calculados a partir dos resultados da simulação no Ansys com os valores obtidos pelo modelo unidimensional apresentado no trabalho de Franco et. Al (2005).

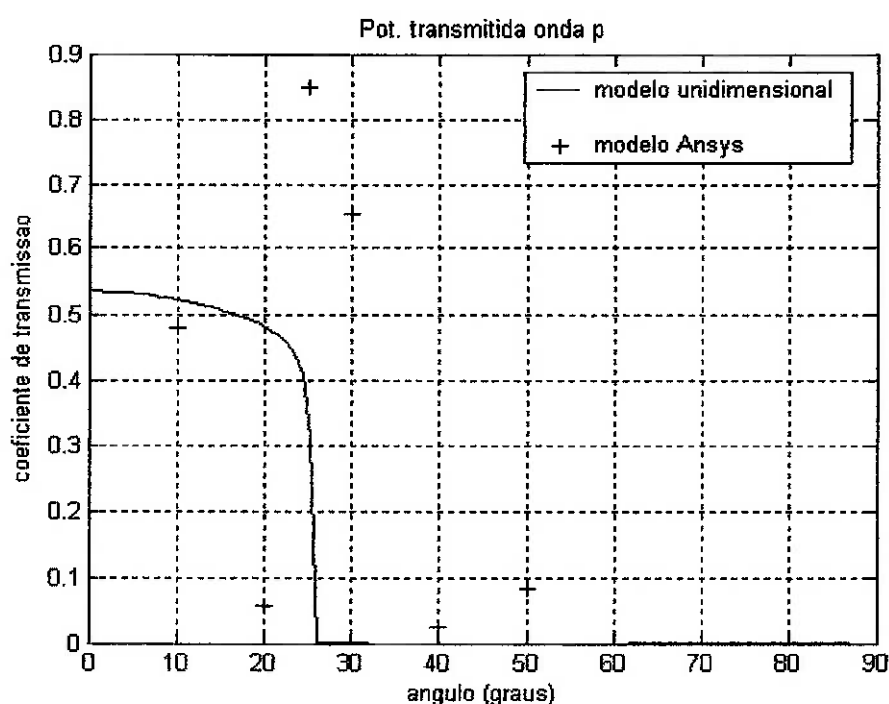


Fig. 60 – Coeficiente de transmissão em potência da onda longitudinal para os modelo em Matlab e modelo em Ansys.

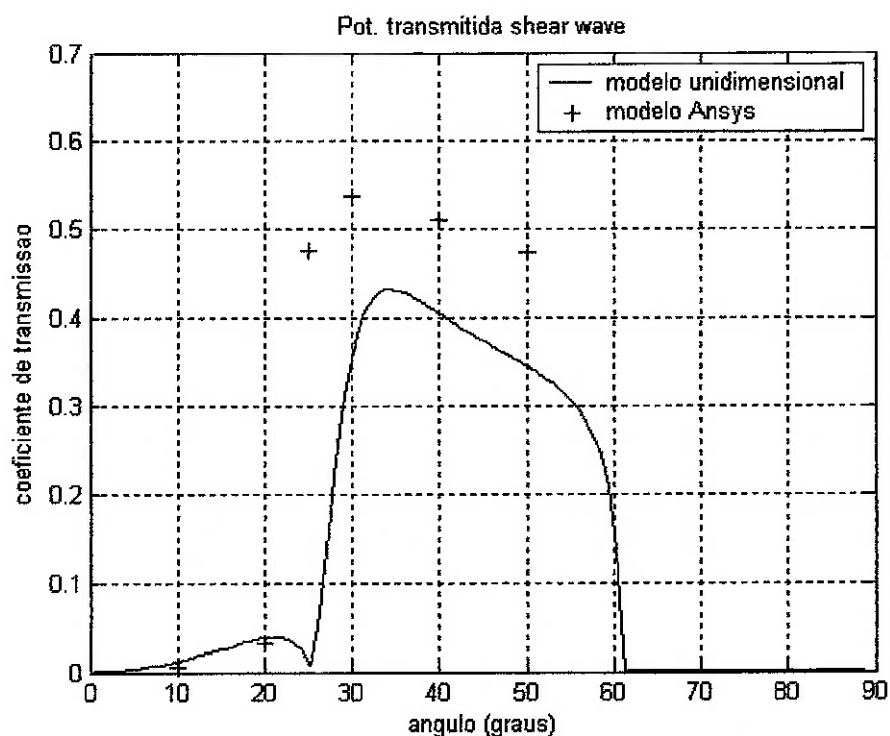


Fig. 61 - Coeficiente de transmissão em potência da onda shear para os modelo em Matlab e modelo em Ansys.

5.2 Transdutor duplo-elemento

Foram realizadas simulações utilizando o método de elementos finitos (Ansys) para se determinar as dimensões do acrílico e o ângulo de inclinação das cerâmicas que garantem que os ecos refletidos nas interfaces do alumínio de espessura 5 mm sejam detectados pelo receptor.

As medidas obtidas estão indicadas na Fig. 62.

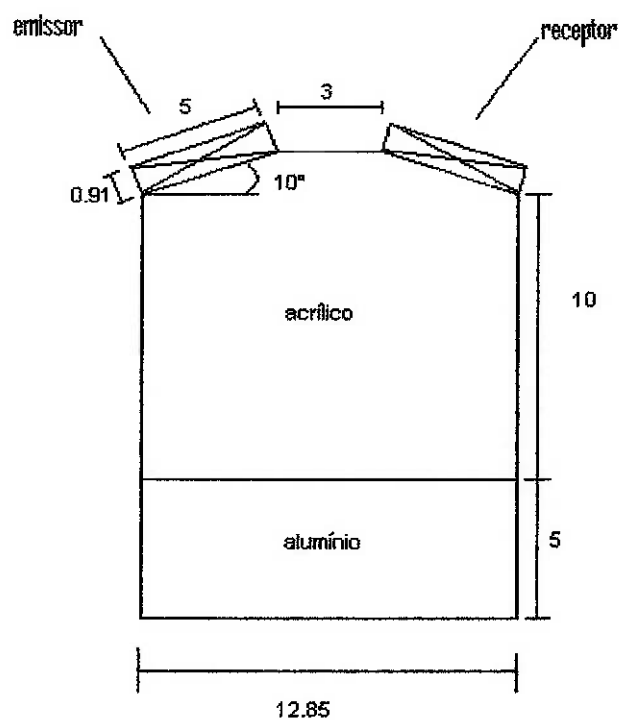


Fig. 62 – Dimensões do acrílico e ângulo de inclinação.

Com estas dimensões, o sinal obtido com a cerâmica de recepção encontra-se na Fig. 63.

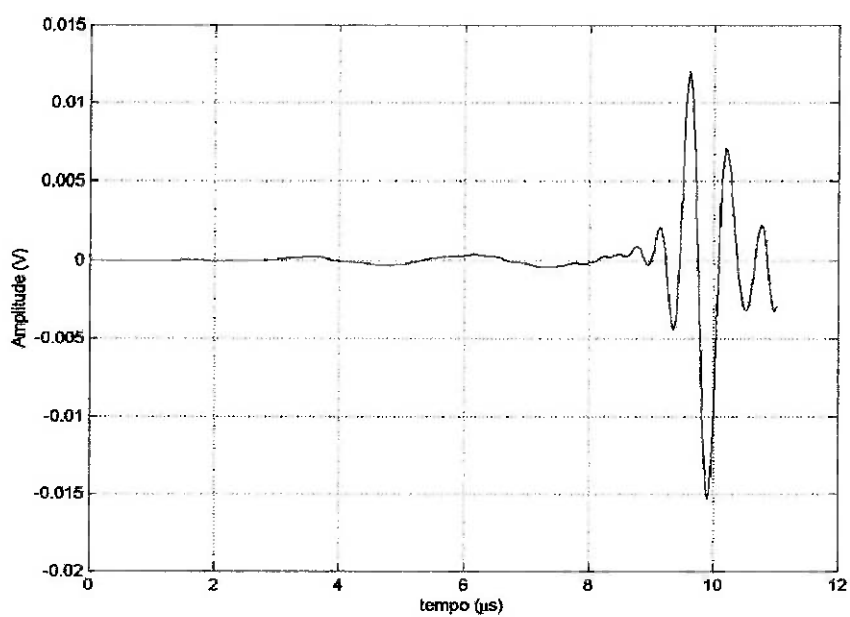


Fig. 63 – Sinal recebido pela cerâmica de recepção.

6. MONTAGEM

Abaixo encontram-se descritos como foram realizadas as montagens dos transdutores monoelemento e duplo-elemento.

6.1 Montagem do transdutor monoelemento

Para a montagem do transdutor monoelemento de frequência 2.2 MHz foram utilizados os seguintes materiais:

- 1 cerâmica piezelétrica PZT5A de diâmetro 22 mm e espessura de 0.91 mm;
- 1 tubo de PVC de diâmetro 22 mm;
- 1 tubo de alumínio de diâmetro 28 mm;
- 1 conector SMA;
- 2 fitas de cobre com espessura de 0.9 mm;
- fios elétricos;
- epóxi (uma bisnaga de poliaminoamida e outra de resina epóxi) e tungstênio.

Inicialmente usinou-se o tubo de PVC para ficar com o diâmetro interno igual ao diâmetro da cerâmica. Em seguida soldou-se um fio elétrico na parte negativa da cerâmica que será utilizado para transmissão e recepção do sinal elétrico e esta cerâmica foi colada no interior do tubo de PVC, como mostra a Fig. 64.



Fig. 64 – Transdutor monoelemento com tubo de PVC, cerâmica e fio.

Preparou-se a camada de backing com uma mistura de epóxi (poliaminoamida e resina epóxi) e tungstênio nas seguintes proporções: 25% em volume de tungstênio e 75% em volume de epóxi. Essa mistura foi deixada no vácuo durante 10 minutos para se retirar às pequenas bolhas e em seguida foi colocada no interior do tubo de PVC sobre a cerâmica, como mostra a Fig. 65.

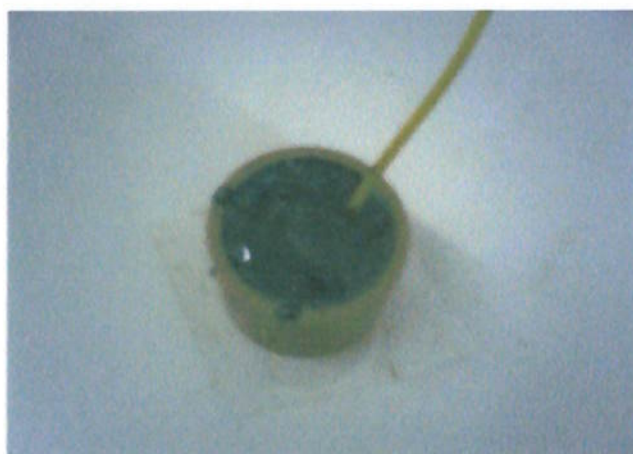


Fig. 65 - Transdutor monoelemento com tubo de PVC, cerâmica, fio e camada de backing.

O tubo de PVC foi colocado em um forno por um dia para se realizar a cura do backing. Após isso foram soldadas duas fitas de cobre na parte positiva da cerâmica piezelétrica para servir como terra. Montou-se uma carcaça para o tubo de PVC utilizando o tubo de alumínio, deixando um pequeno espaço para se colocar a camada de matching na frente da cerâmica. Preparou-se a camada de matching usando apenas epóxi (poliaminoamida e resina epóxi). Por último, foram soldados os fios elétricos (fio de sinal e fio terra) no conector SMA fêmea reto. A Fig. 66 ilustra o esquema do transdutor montado.

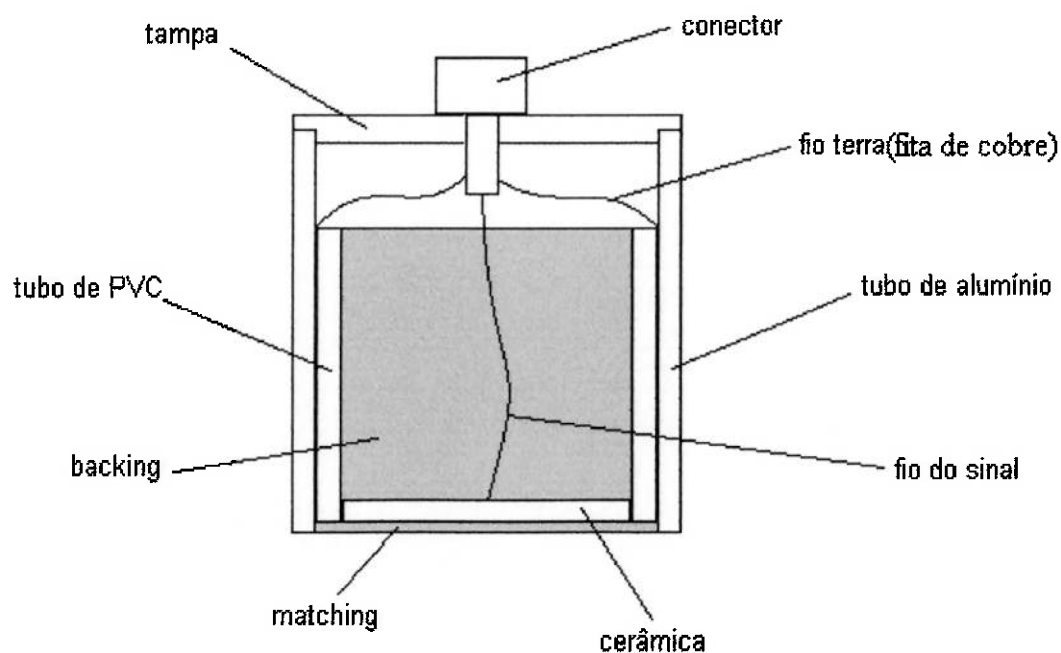


Fig. 66 – Esquema do transdutor mono-elemento de frequência 2.2 MHz.

6.2 Montagem do transdutor duplo-elemento

Para a montagem do transdutor duplo-elemento de frequência central de 2.2 MHz foram utilizados os seguintes materiais:

- 2 cerâmica piezoelétrica PZT5A de diâmetro 12 mm e espessura de 1 mm;
- 1 cunha de acrílico;
- 1 tubo de alumínio de diâmetro 38 mm;
- 2 conectores SMA;
- fios elétricos;
- epóxi (uma bisnaga de poliaminoamida e outra de resina epóxi) e tungstênio.

Inicialmente foi usinado um tarugo de acrílico, com as medidas indicadas na Fig. 67.

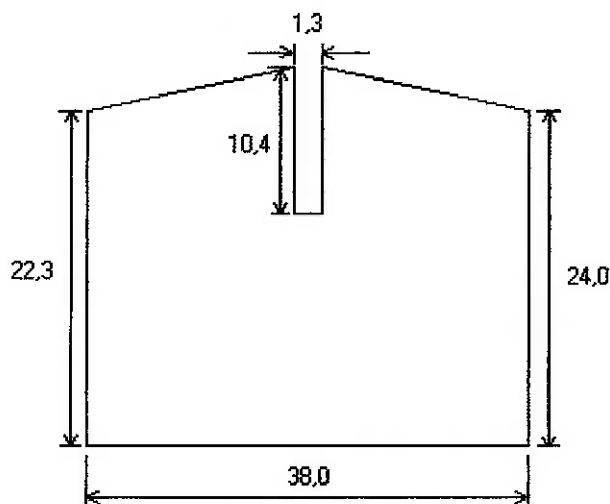


Fig. 67 - Esquema da peça de acrílico.

Em seguida, foi usinado um tubo de alumínio, a partir de um tarugo, com diâmetro interno de 38 mm, diâmetro externo de 44 mm e comprimento de 45 mm. Depois foram soldados os fios nos dois lados das cerâmicas, que foram colados na peça de acrílico sem araldite. As cerâmicas foram coladas de tal forma que não houvesse espaço entre elas e o acrílico. Para isso, foram feitos pequenos rasgos no acrílico, de forma que os fios soldados na face em contato com a cerâmica entrassem nele. A Fig. 68 mostra a foto do acrílico com as cerâmicas coladas.

Com as cerâmicas coladas no acrílico, a peça resultante foi colocada dentro do tubo de alumínio de e colado. Foi preparada a camada de backing com o epóxi e o tungstênio nas proporções de 75% e 25% em volume, respectivamente. Essa mistura foi deixada no vácuo por aproximadamente 10 minutos para se retirar as bolhas de ar. Depois, esta mistura foi colocada na parte de trás do transdutor. Por último, os fios foram soldados nos conectores SMA. A Fig. 69 a seguir mostra o esquema do transdutor montado.

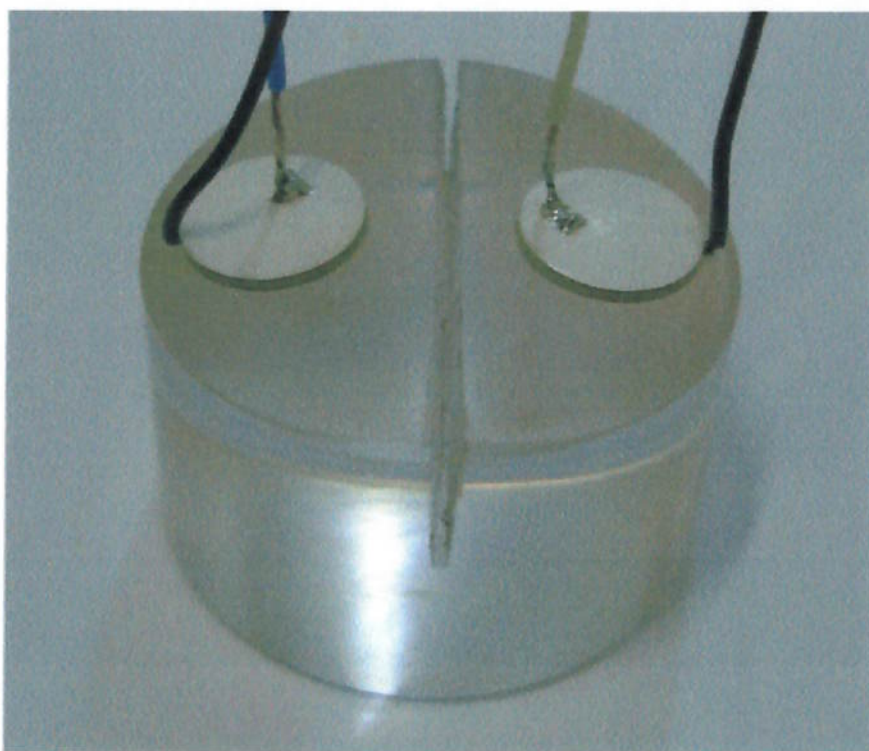


Fig. 68 - Peça de acrílico com as cerâmicas coladas.

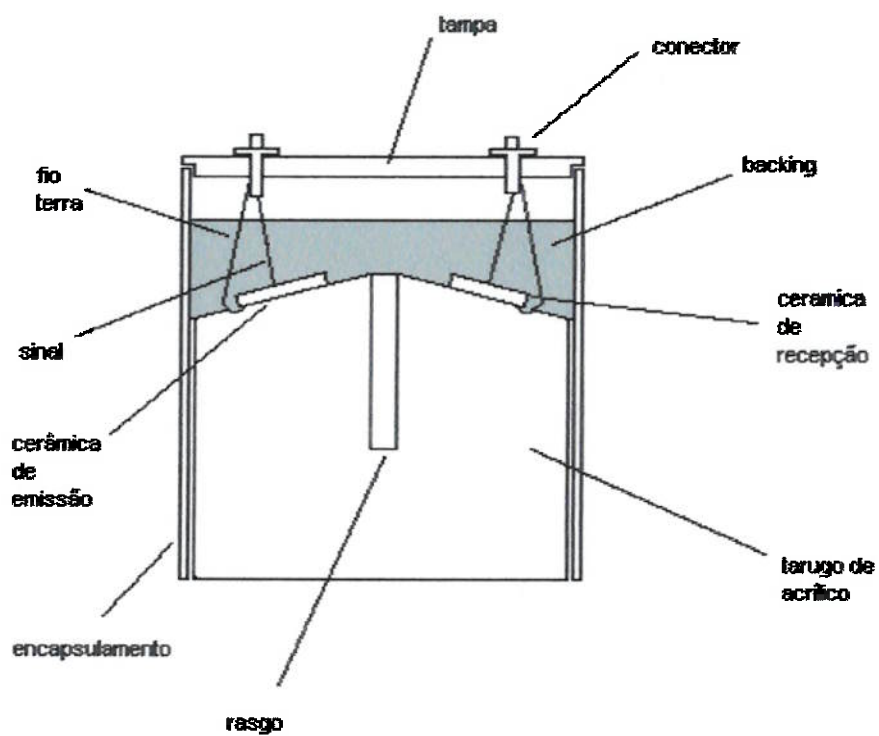


Fig. 69 - Esquema do transdutor duplo-elemento de frequência 2.2 MHz.

7 ENSAIOS

Para o transdutor monoelemento, foram realizadas medições da resposta impulsiva. A resposta impulsiva foi medida nos meios de propagação água e acrílico. O transdutor monoelemento foi excitado com um pulso elétrico estreito utilizando o equipamento Panametrics Model 5072 PR, gerando uma onda que se propagou através do meio e atingiu o tarugo de alumínio. Esta onda refletiu, retornando ao transdutor. A aquisição do sinal refletido foi feito com o osciloscópio A/D HP Infinium 500 MHz e 2G Sa/s. As Fig.s 70 e 71 ilustram como foram realizadas as medições na água e no acrílico respectivamente.

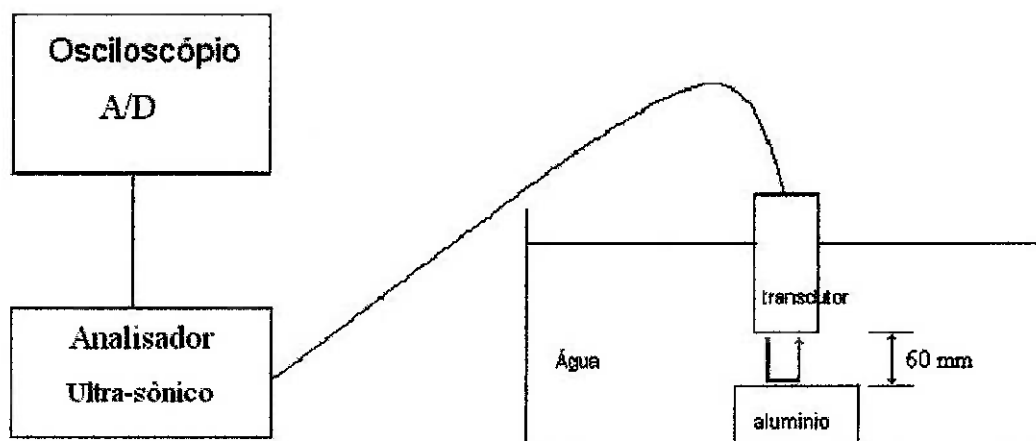


Fig. 70 – Esquema da medição na água.

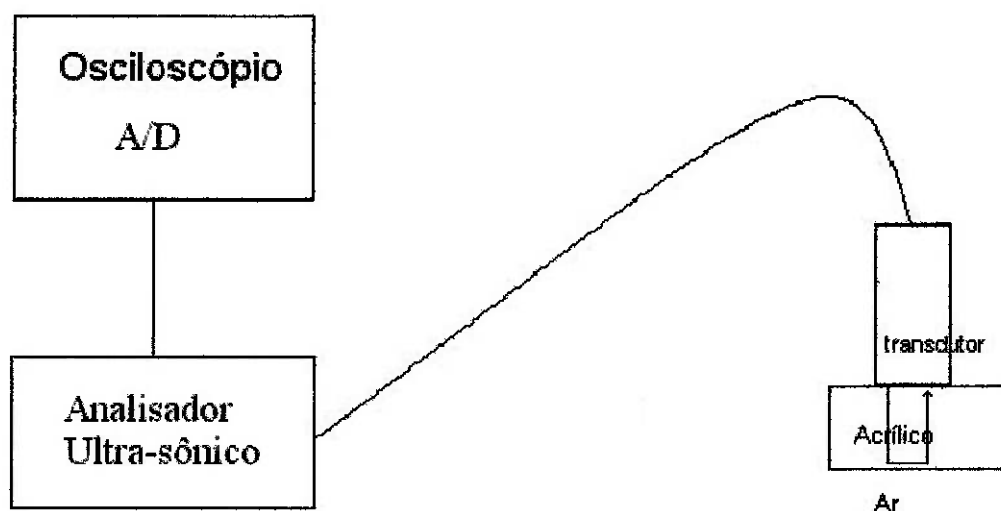


Fig. 71 – Esquema de medição no acrílico.

A medição na água foi realizada em um aquário, utilizando o transdutor monoelemento montado e uma peça de alumínio situada a 60 mm de distância. As configurações utilizadas no analisador ultra-sônico foram ganho de 0, PRF de 100, HPF em 1 MHz e LPF em 10 MHz.

A medição no acrílico foi realizada com a peça em contato com o transdutor monoelemento montado. As configurações utilizadas no analisador ultra-sônico foram ganho de 0, PRF de 100, HPF em 1 MHz e LPF em 10 MHz.

A partir da resposta impulsiva foi obtida a FTER utilizando a transformada de Fourier.

Abaixo encontram-se os resultados obtidos com os transdutores monoelemento e duplo-elemento montados. Foi também utilizado um transdutor monoelemento montado por um aluno de pós-graduação e, neste caso, foram medidas a resposta impulsiva e a impedância elétrica. A impedância elétrica foi medida com o impedômetro fasorial da HP.

7.1 Transdutor monoelemento de um aluno de pós-graduação

O transdutor construído pelo aluno de pós-graduação possui uma cerâmica de PZT5A com as seguintes características: frequência de ressonância de 2 MHz, diâmetro de 12.7 mm e espessura de 0.97 mm. A camada de backing deste transdutor é formado por epóxi (poliaminoamida e resina epóxi) e tungstênio com proporção de 75% e 25% em volume, respectivamente.

A seguir, encontram-se as Figs de comparação entre os resultados obtidos com o modelo teórico unidimensional (ver item 3.1) implementados em MatLab e os resultados experimentais obtidos com o transdutor construído.

Na Fig. 72 encontra-se a comparação entre as funções de transferência de emissão e recepção teórica e experimental. Observa-se nesta Fig. que a frequência de ressonância teórica e experimental ocorre no valor de aproximadamente 2 MHz. Na Fig. 73 a seguir, encontra-se a comparação entre os modelos teórico e experimental do sinal de retorno obtido pelo transdutor.

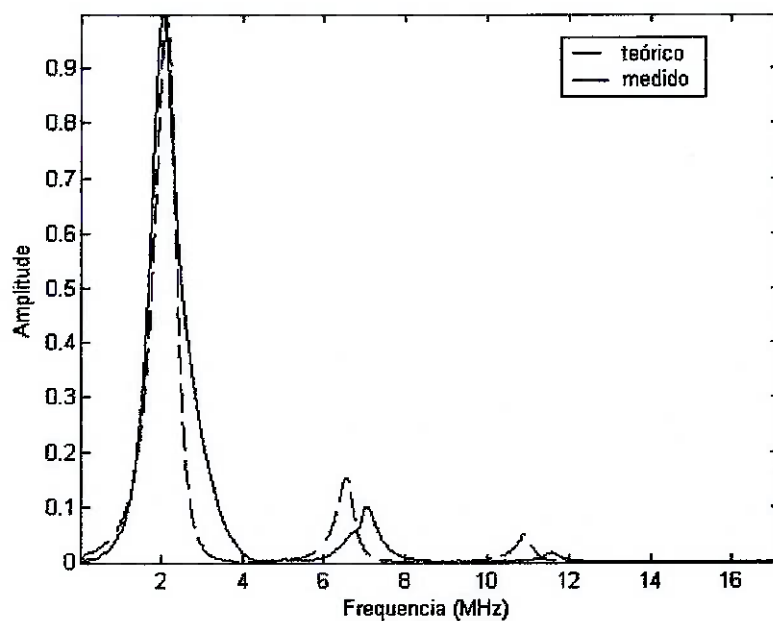


Fig. 72 – Função de Transferência de Emissão e Recepção.

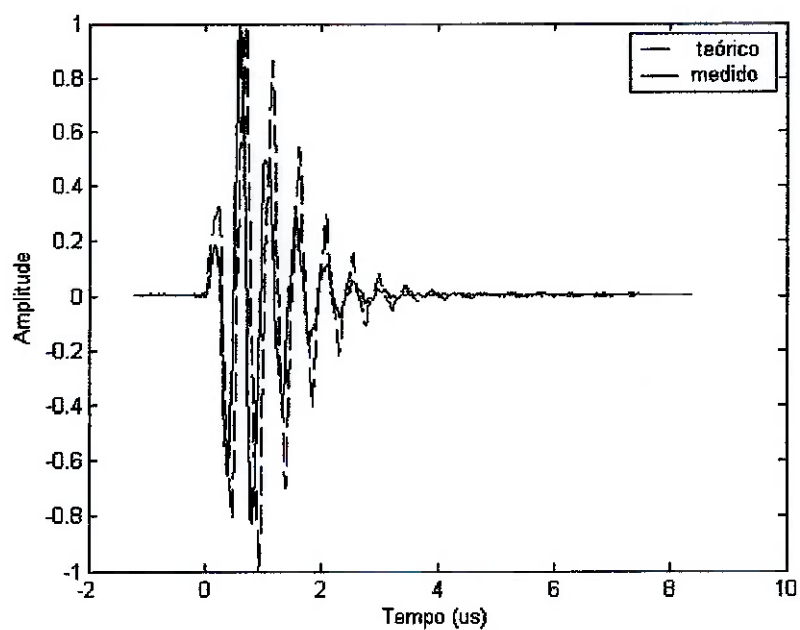


Fig. 73 - Sinal de retorno recebido pelo transdutor.

A impedância elétrica foi medida utilizando um impedômetro fasorial. Foram feitas duas medições: uma com o transdutor no ar e outra na água. Nas Figs 74 e 75, encontram-se a comparação entre o modelo teórico do módulo e da fase,

respectivamente, da impedância elétrica obtida pelo MatLab e do modelo real obtido experimentalmente com o transdutor, ambos obtidos para o ar.

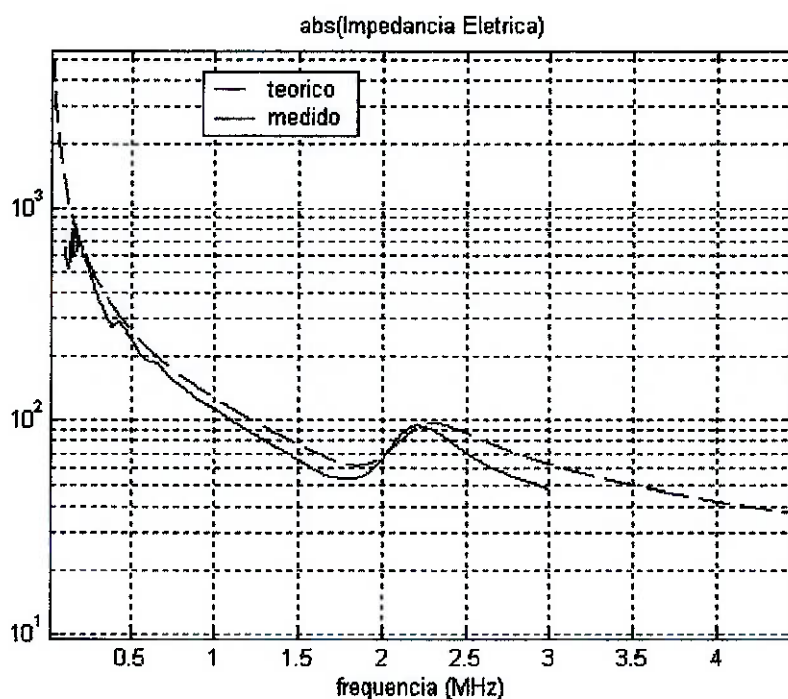


Fig. 74 – Módulo da impedância elétrica pela frequência no ar.

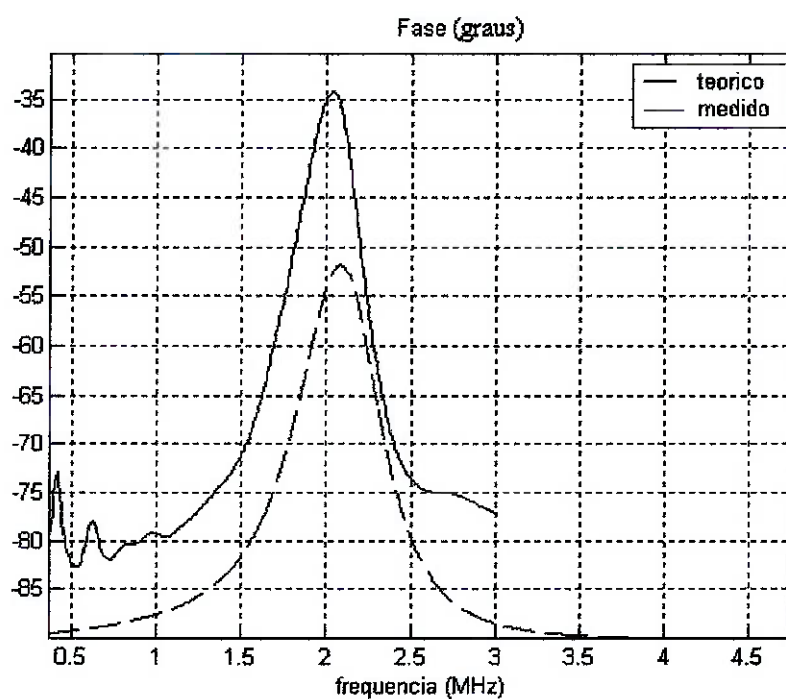


Fig. 75 – Fase da impedância pela frequência no ar.

Nas Figs 76 e 77 a seguir, encontram-se a comparação entre o modelo teórico do módulo e da fase, respectivamente, da impedância elétrica obtida pelo MatLab e do modelo real obtido experimentalmente pelo transdutor, ambos obtidos para a água.

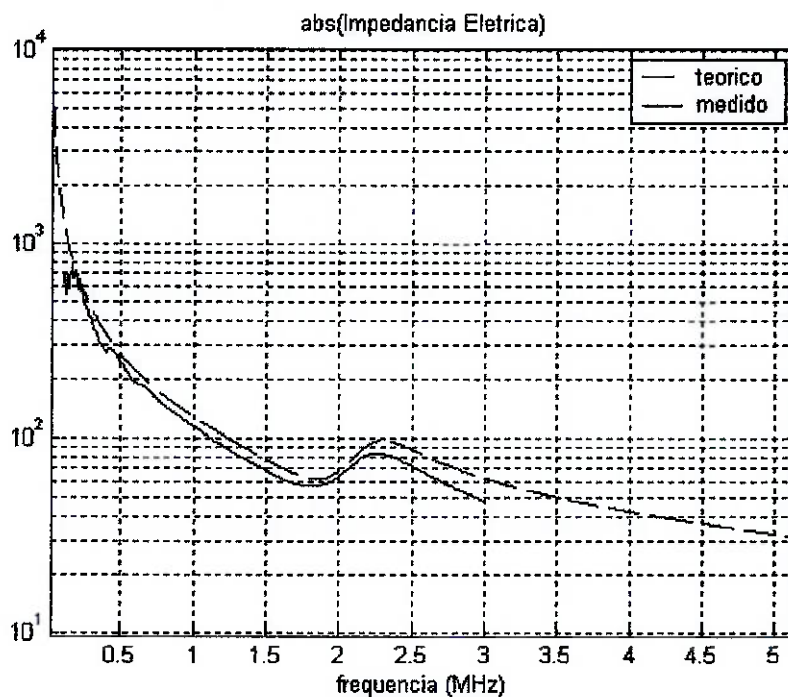


Fig. 76 – módulo da impedância elétrica pela frequência na água.

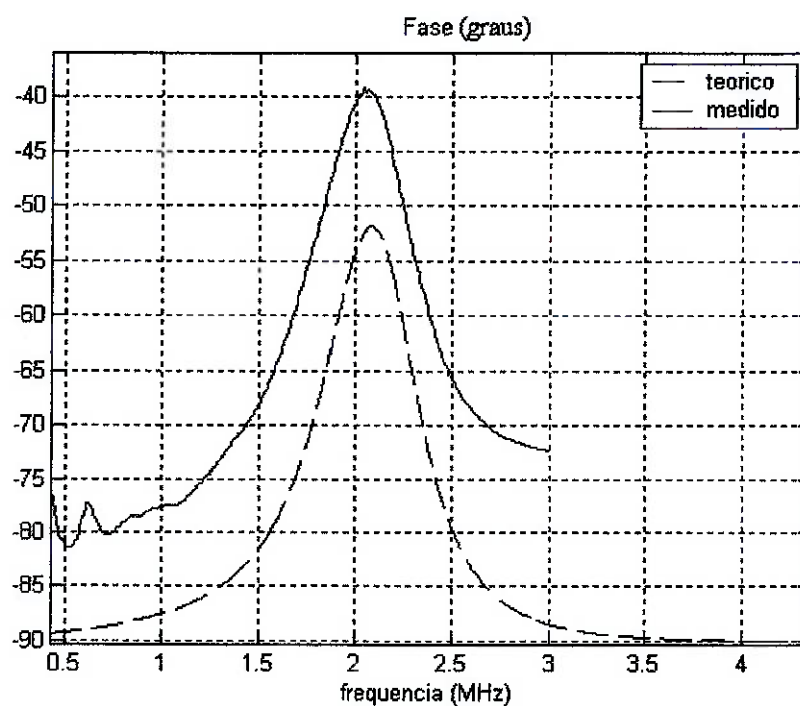


Fig. 77 – Fase da impedância pela frequência na água.

7.2 Primeiro transdutor monoelemento montado

Os resultados mostrados a seguir foram obtidos com o transdutor já com a camada de matching.

Na Fig. 78 abaixo, encontra-se a comparação entre o eco obtido experimentalmente com o transdutor ao emitir um pulso no material de acrílico e o eco simulado com o modelo teórico do Matlab.

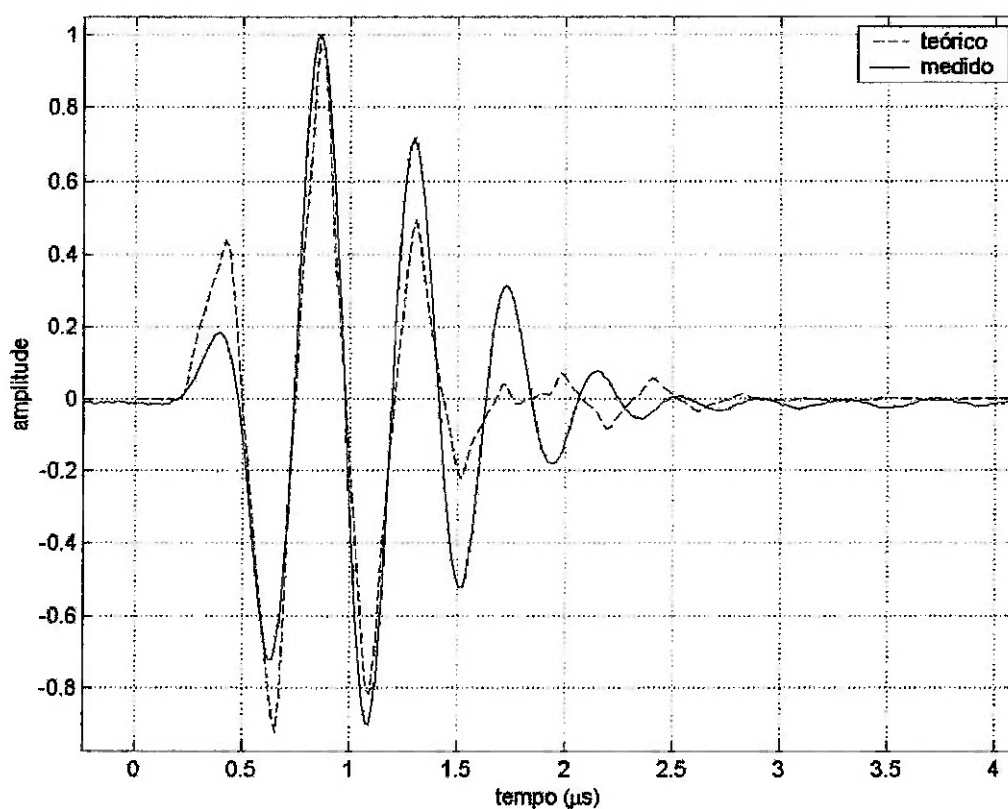


Fig. 78 – Resposta impulsiva no acrílico.

Na Fig. 79, encontra-se a comparação entre a função de transferência de emissão e recepção medida experimentalmente no acrílico e a obtida pelo modelo teórico do Matlab.

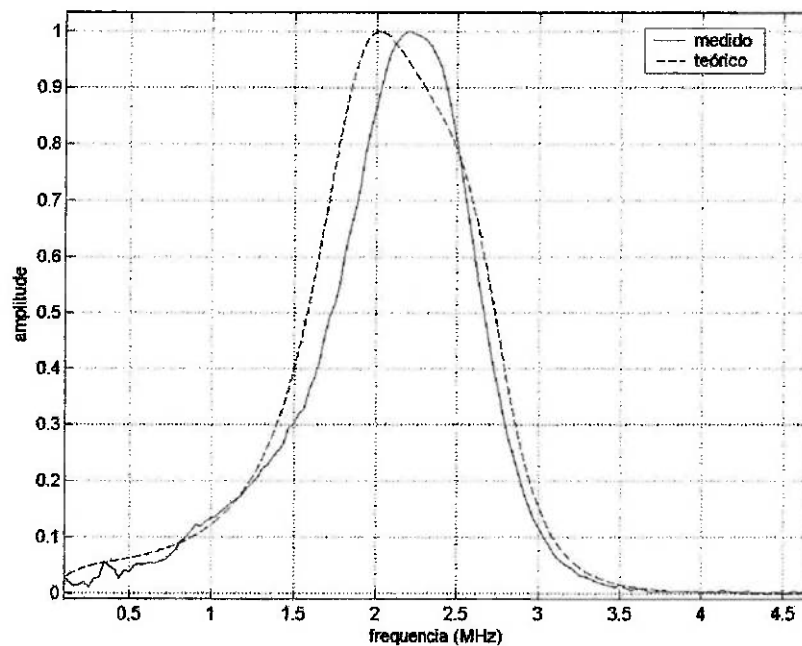


Fig. 79 – FTER no acrílico.

Na Fig. 80 a seguir, encontra-se a comparação entre o eco medido experimentalmente pelo transdutor ao emitir um pulso na água e o eco simulado pelo modelo teórico.

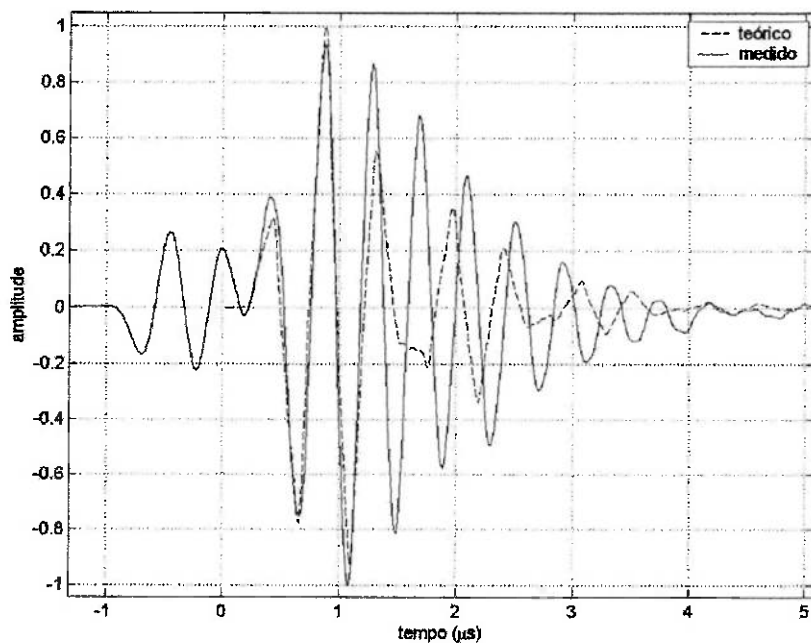


Fig. 80 – Resposta impulsiva na água.

Na Fig. 81, encontra-se a comparação da função de transferência de emissão e recepção entre o eco medido experimentalmente na água e o eco simulado pelo modelo teórico do Matlab.

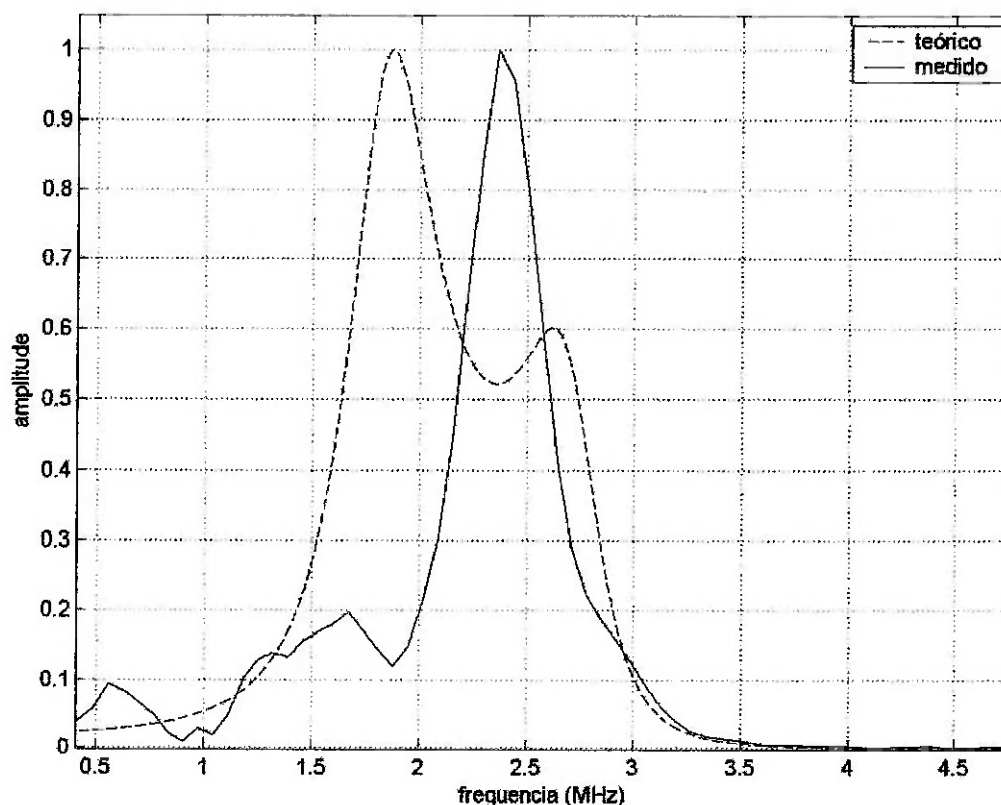


Fig. 81 – FTER na água.

7.3 Segundo transdutor monoelemento montado

Inicialmente foram realizadas medições sem a camada de matching. Em seguida foi colocada a camada de matching e repetidas medições.

7.3.1 Sem camada de matching

Para o transdutor monoelemento sem camada de matching, foram comparadas a resposta impulsiva e a função de transferência de emissão e recepção obtidas experimentalmente com as obtidas com o modelo teórico. A Fig. 82 ilustra a

comparação da resposta impulsiva e a Fig. 83 a comparação da função de transferência de emissão e recepção, ambas no acrílico.

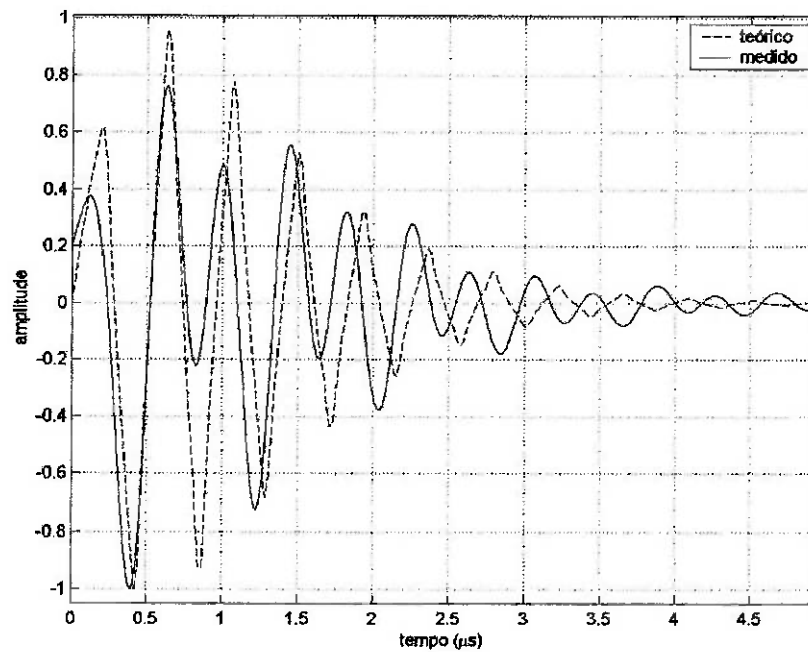


Fig. 82 – Resposta impulsiva no acrílico.

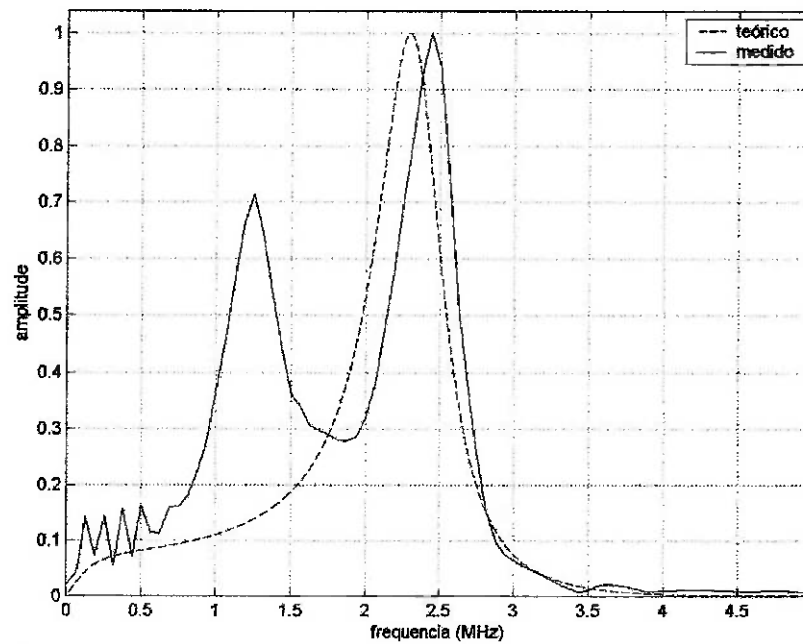


Fig. 83 - FTER no acrílico.

Na Fig. 84 a seguir, encontra-se a comparação entre o eco medido experimentalmente pelo transdutor ao emitir um pulso na água e o eco obtido pelo modelo teórico.

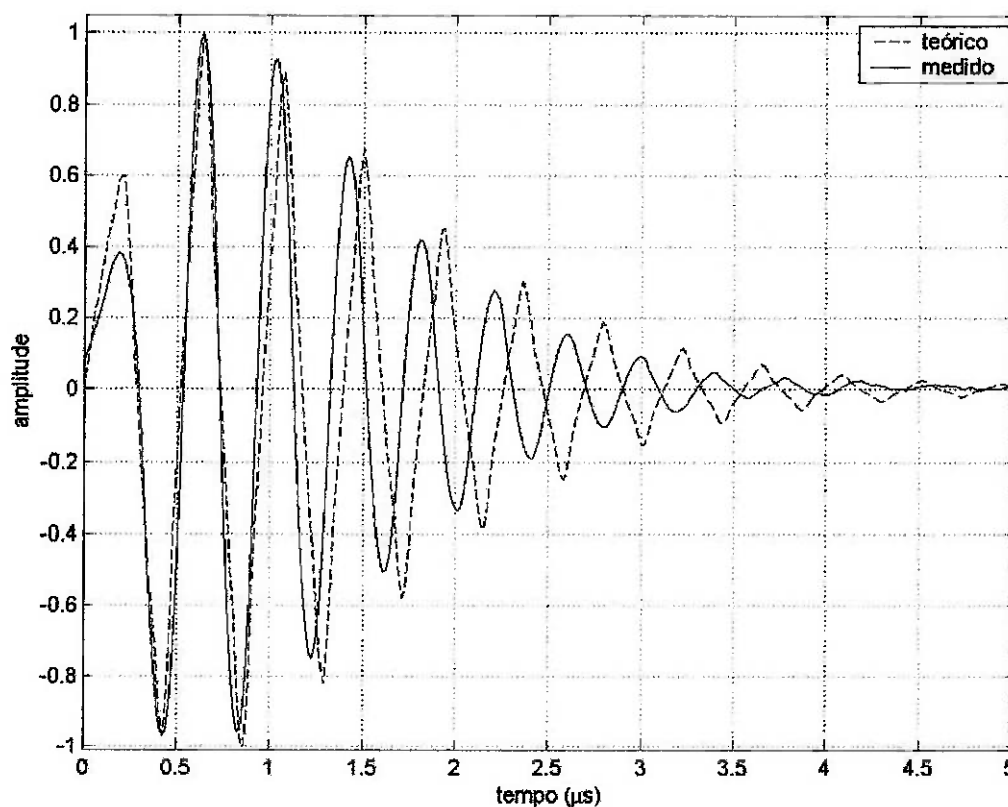


Fig. 84 – Resposta impulsiva na água.

Na Fig. 85, encontra-se a comparação da função de transferência de emissão e recepção do eco obtido experimentalmente na água com a do eco simulado pelo modelo teórico do Matlab.

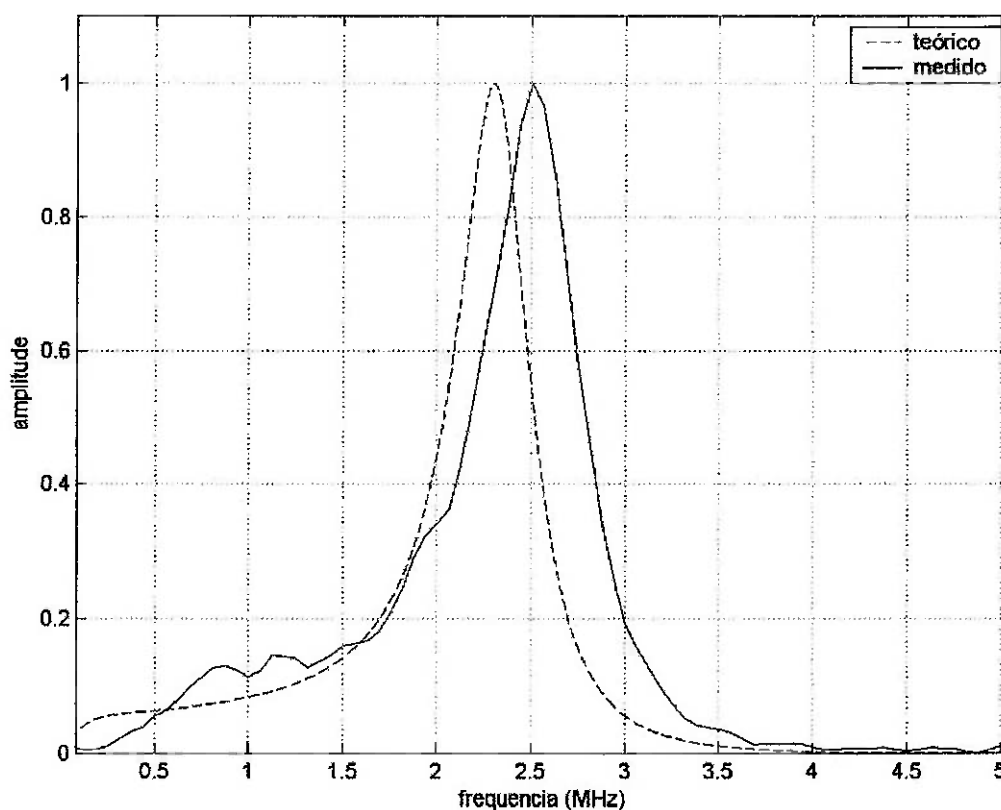


Fig. 85 – FTER na água.

Em seguida foram feitas medições da resposta impulsiva, com indutores de diversos valores ligados em paralelo com a cerâmica, de acordo com a Fig. 86, a fim de se obter um indutor que case melhor a impedância elétrica. Na Fig. 87, encontra-se o gráfico do valor máximo absoluto da função de transferência em função dos indutores. A partir desse gráfico, observa-se que o valor de indutância que fornece a maior amplitude da função de transferência é o indutor de $6.8 \mu\text{H}$.

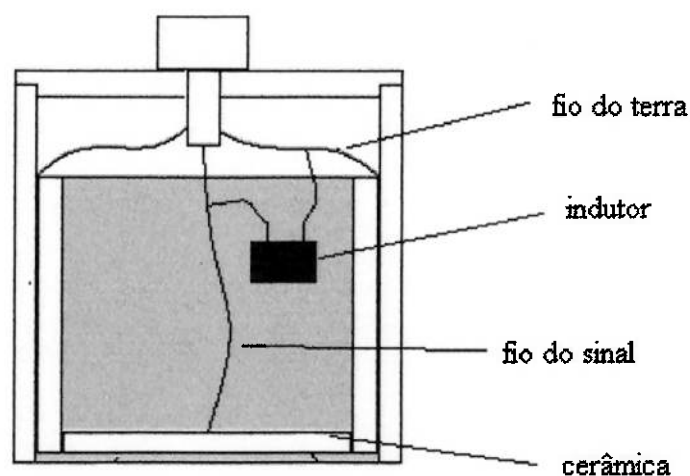


Fig. 86 – Transdutor com indutor em paralelo.

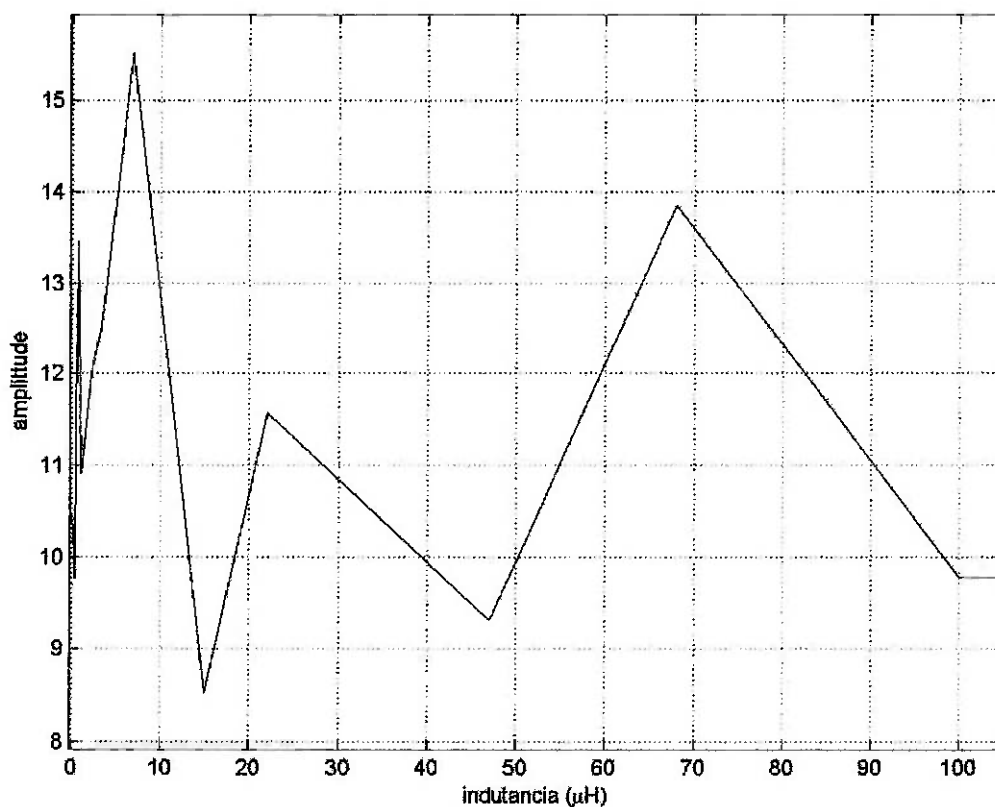


Fig. 87 – Valor máximo absoluto em função da indutância para o transdutor sem matching.

A Fig. 88 a seguir mostra a comparação da função de transferência para o transdutor sem indutor, com indutor de 6.8 μH e de 15 μH .

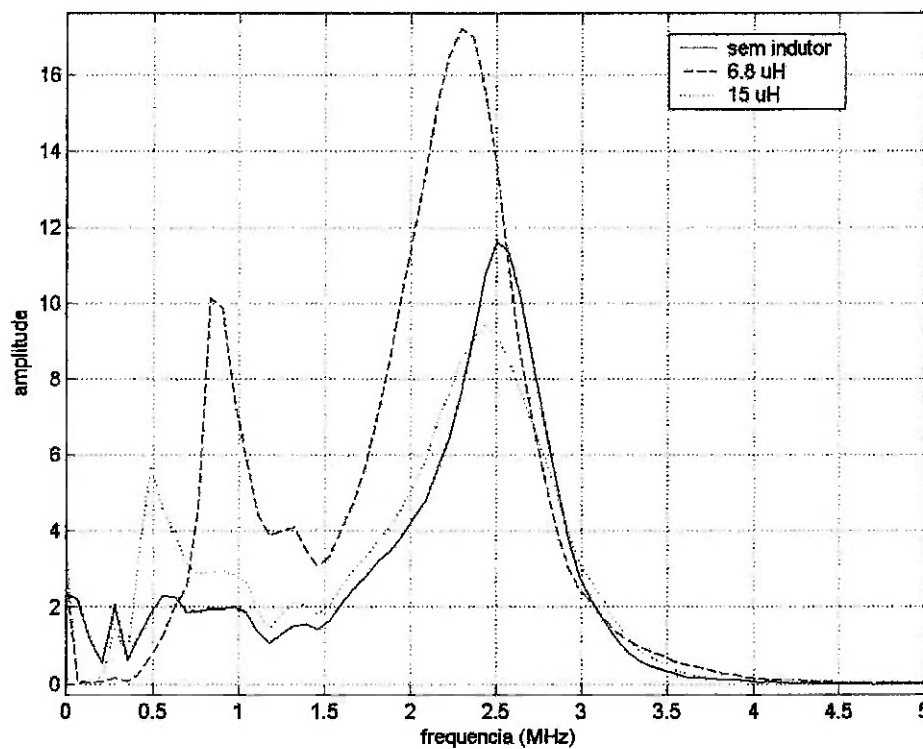


Fig. 88 – Comparação da função de transferência para o transdutor sem indutor, com indutor de 6.8 μH e com indutor de 15 μH .

A Fig. 89 a seguir mostra a comparação da resposta impulsiva do transdutor sem matching para os dois casos: sem indutor e com indutor de 6.8 μH .

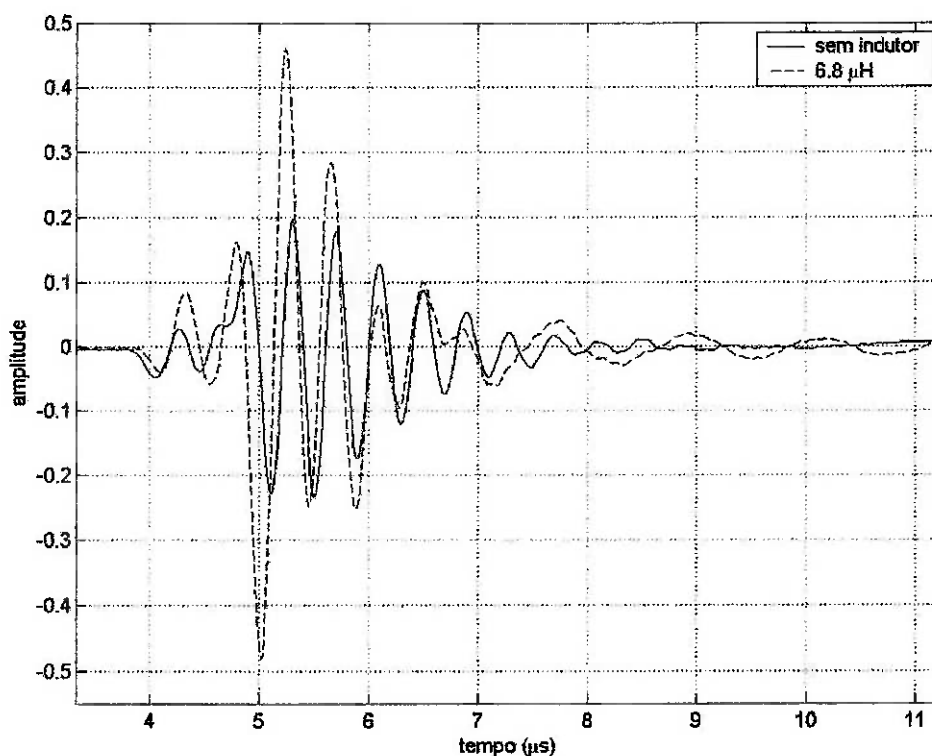


Fig. 89 – Comparação da resposta impulsiva do transdutor sem indutor e com indutor de 6.8 μH utilizando o transdutor sem matching.

7.3.2 Com camada de matching

Para o transdutor com camada de matching, foram feitas as mesmas medidas que sem a camada de matching.

A Fig. 90 a seguir mostra a comparação da resposta impulsiva do transdutor, teórico e medido, na água.

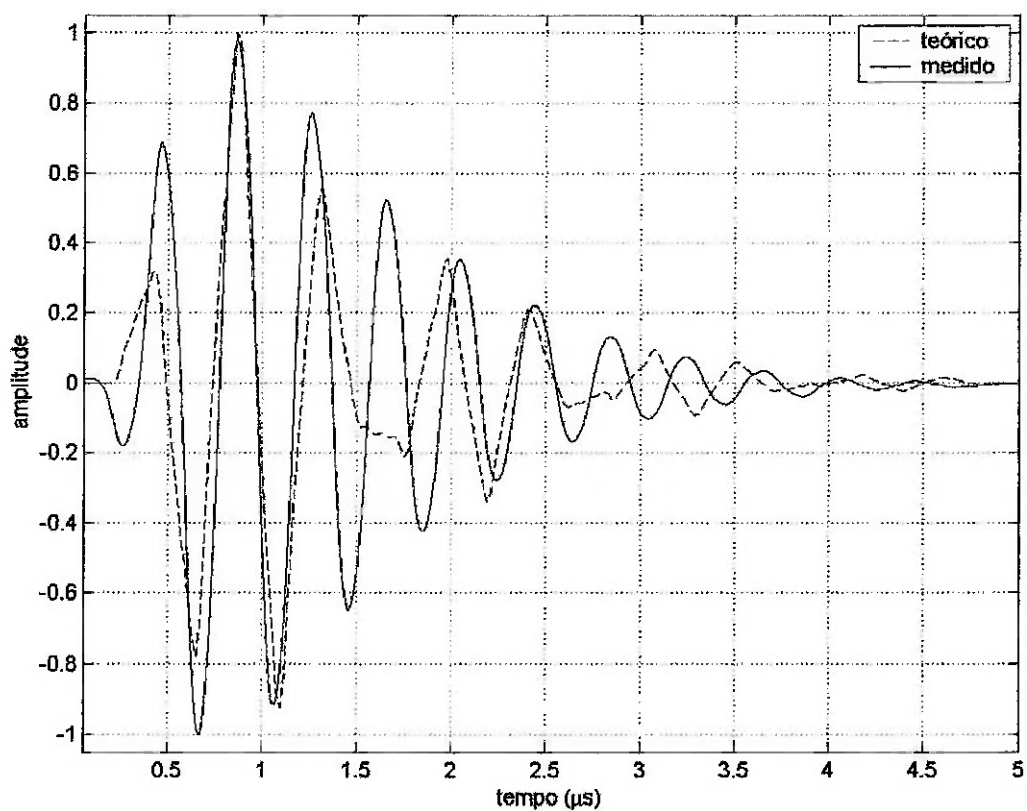


Fig. 90 – Comparação da resposta impulsiva na água.

A Fig. 91 a seguir mostra o gráfico com a comparação da FTER do transdutor entre os resultados obtidos com o modelo teórico e experimentalmente, na água.

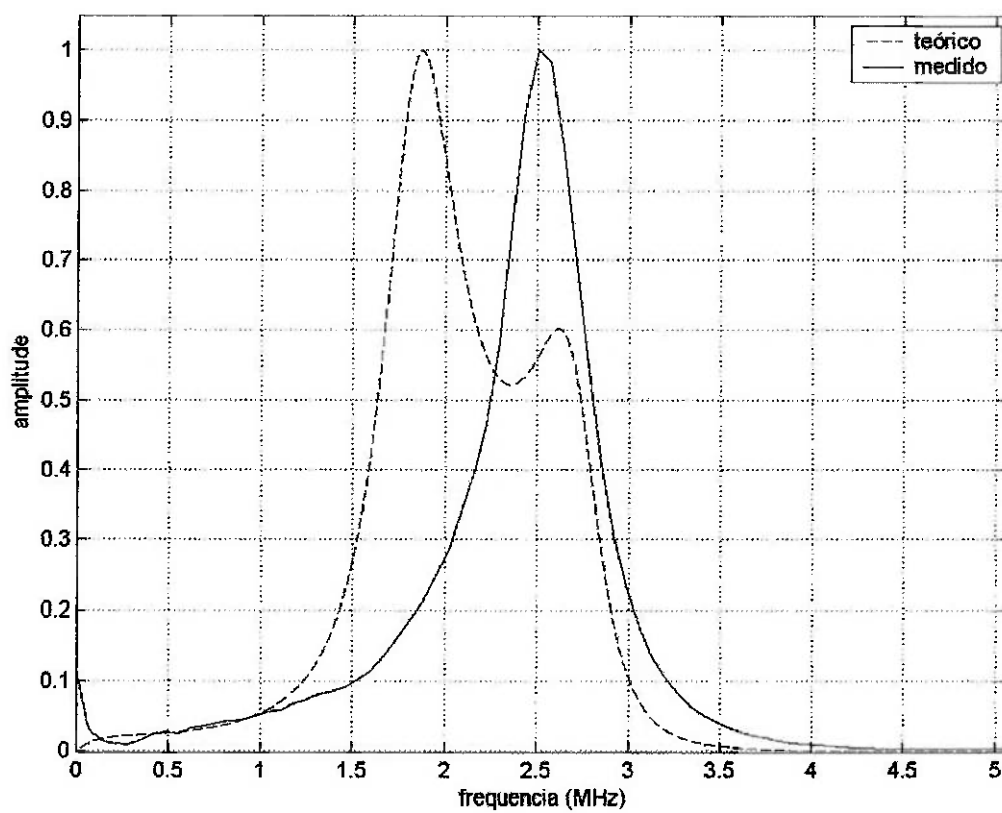


Fig. 91 – Comparação da FTER na água.

A Fig. 92 a seguir mostra a comparação da resposta impulsiva do transdutor, teórico e medido, no acrílico.

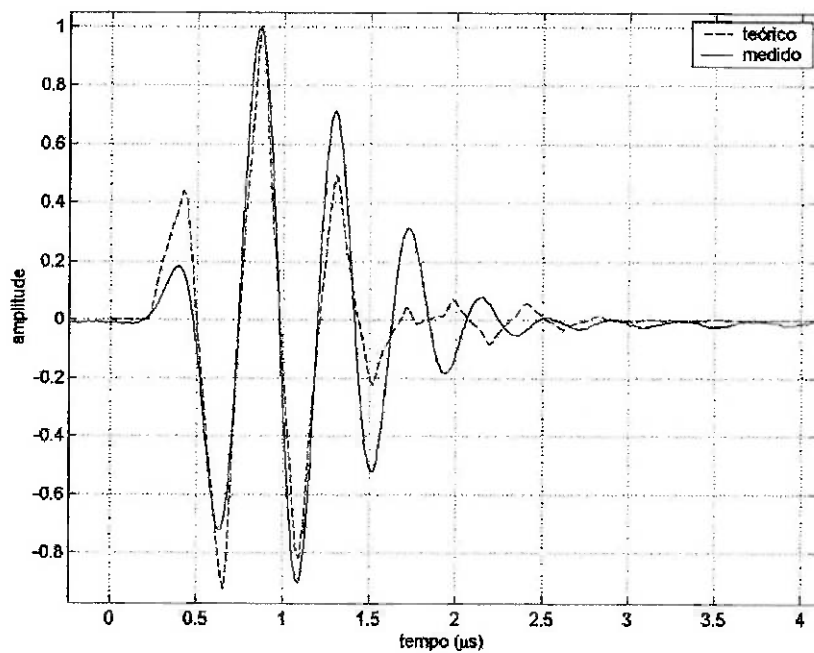


Fig. 92– Comparação da resposta impulsiva no acrílico.

A Fig. 93 a seguir mostra o gráfico com a comparação da FTER do transdutor entre os resultados obtidos com o modelo teórico e experimentalmente, no acrílico.

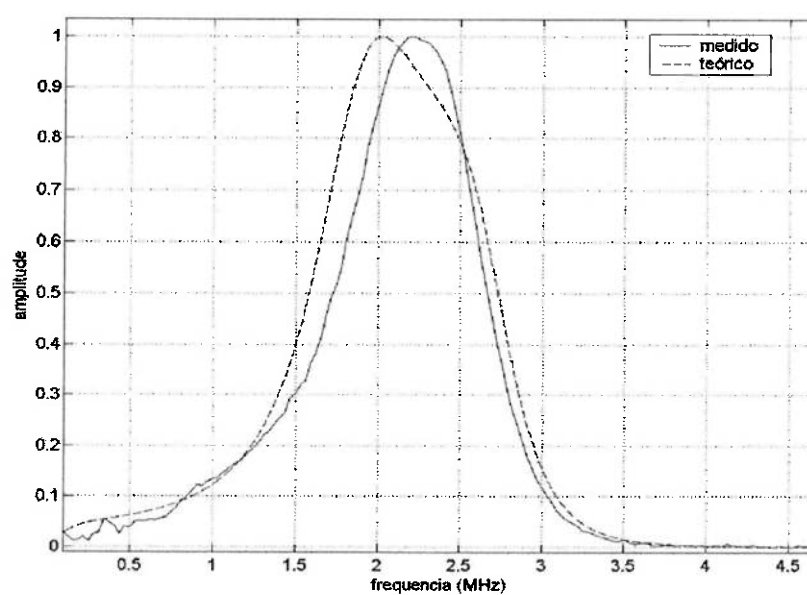


Fig. 93 - Comparação da FTER no acrílico.

Para as medidas com os indutores, foi obtido o gráfico da Fig. 94, que representa o valor máximo absoluto em função da indutância.

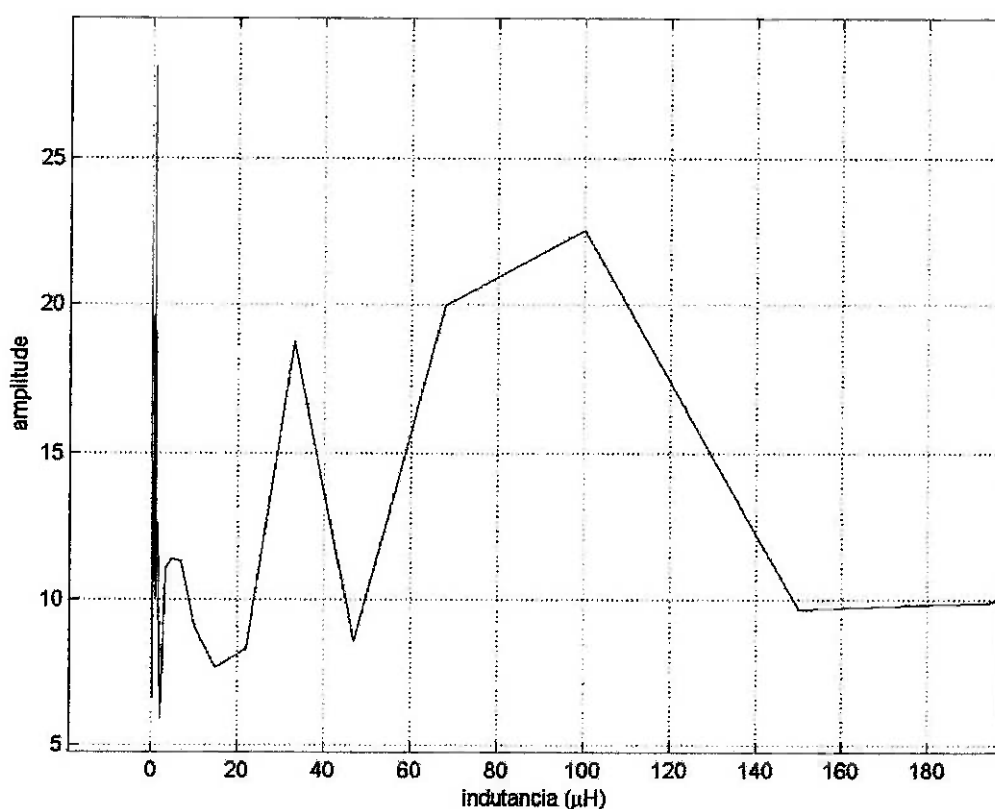


Fig. 94 - Valor máximo absoluto em função da indutância para o transdutor com matching.

A Fig. 95 ilustra uma comparação das FTER para o caso sem indutor, com indutor de 0.68 μH e com indutor de 47 μH.

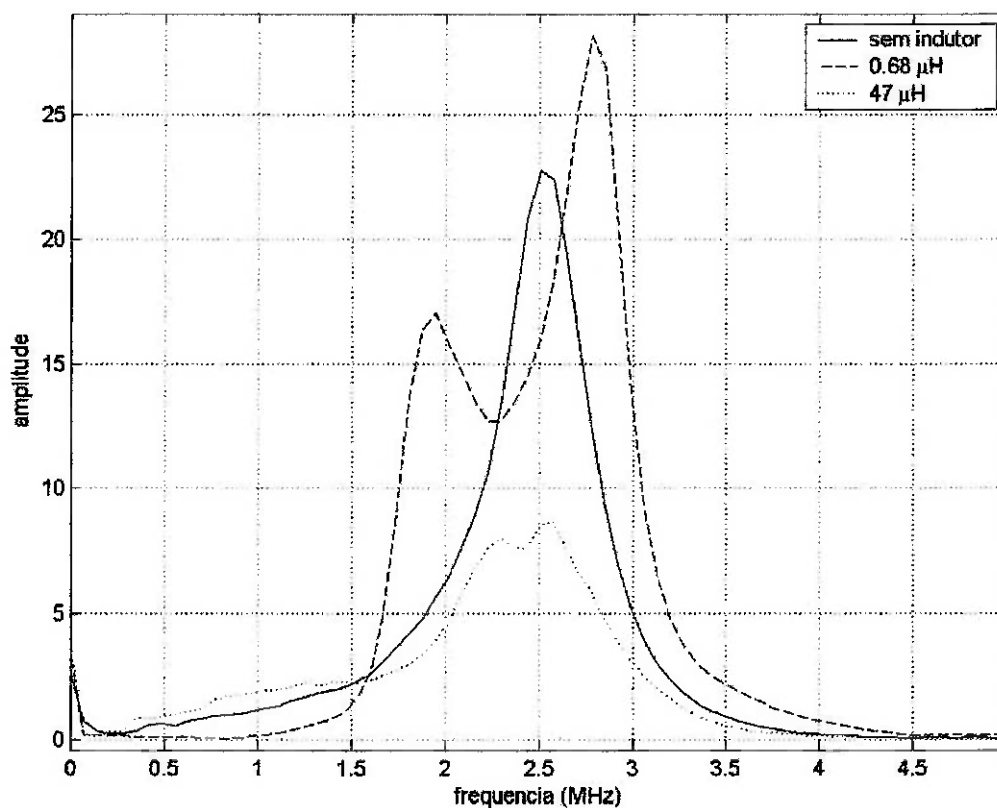


Fig. 95 - Comparação da FTER entre o transdutor sem indutor, com indutor de 0.68 μH e com indutor de 47 μH (transdutor com matching).

A Fig. 96 ilustra a comparação da resposta impulsiva do transdutor com matching para os casos sem indutor e com indutor de 0.68 μH .

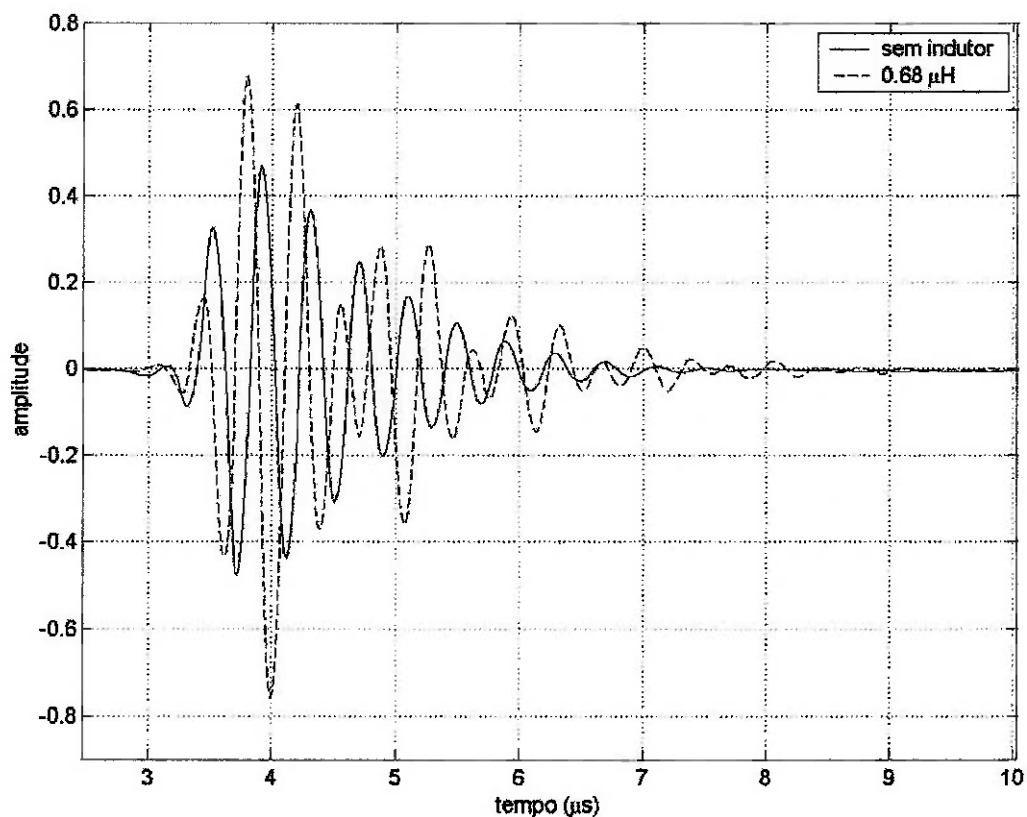


Fig. 96 - Comparação da resposta impulsiva do transdutor sem indutor e com indutor de 0.68 μH .

7.4 Transdutor Duplo-Elemento

Para este transdutor, foram feitas medições do sinal recebido pelo transdutor de recepção em chapas de alumínio de espessuras diferentes. A medição foi feita utilizando o transdutor duplo-elemento montado, o analisador ultra-sônico da Panametrics Model 5072 PR e o osciloscópio da HP Infinium 500 MHz e 2GSa/s, como mostrado na Fig. 97.

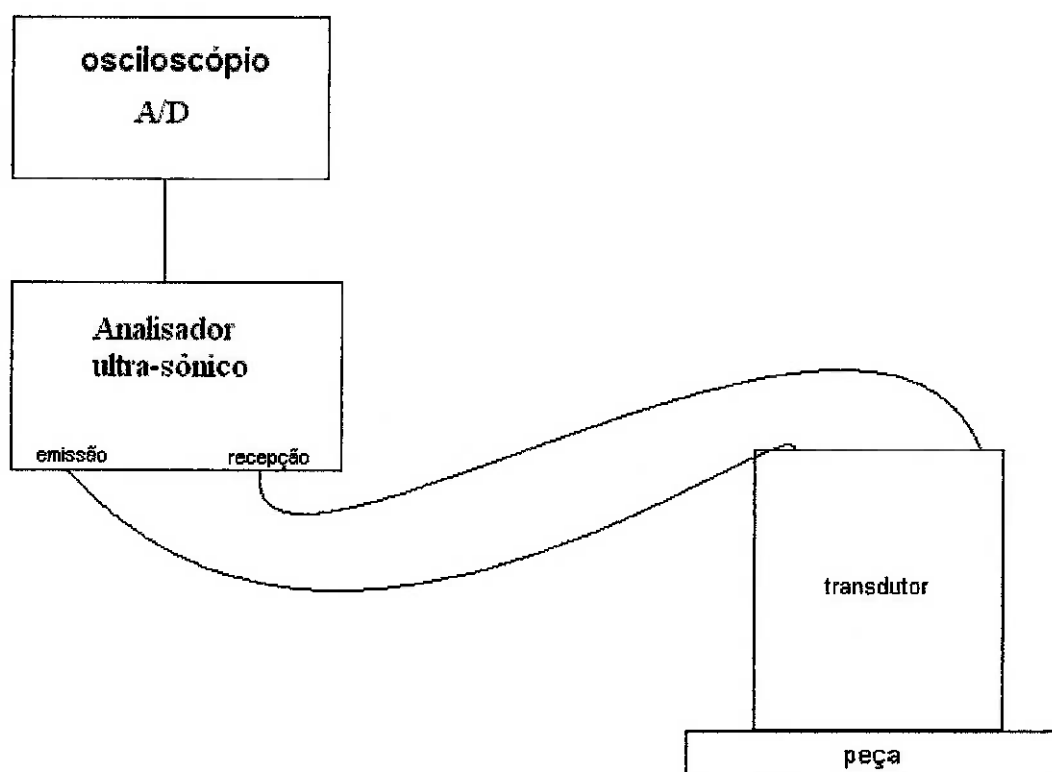


Fig. 97 - Esquema da medição com o transdutor duplo-elemento.

Os ecos refletidos na medição com o transdutor duplo-elemento são mostrados na Fig. 98 a seguir. A onda 1 é a onda que reflete na interface entre o acrílico e o alumínio, a onda 2 é a que reflete na superfície oposta do alumínio.

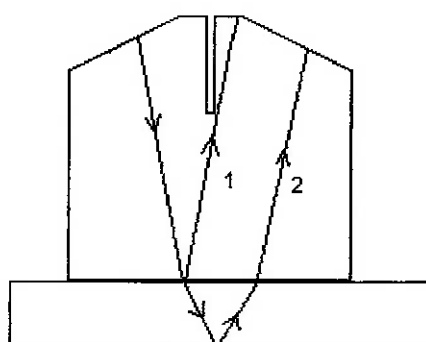


Fig. 98 - Esquema das reflexões no acrílico e no alumínio.

A Fig. 99 mostra o sinal recebido para a chapa de alumínio com espessura de 3 mm. Pela Fig., observa-se que não é possível distinguir as ondas 1 e 2 representadas na Fig. 98.

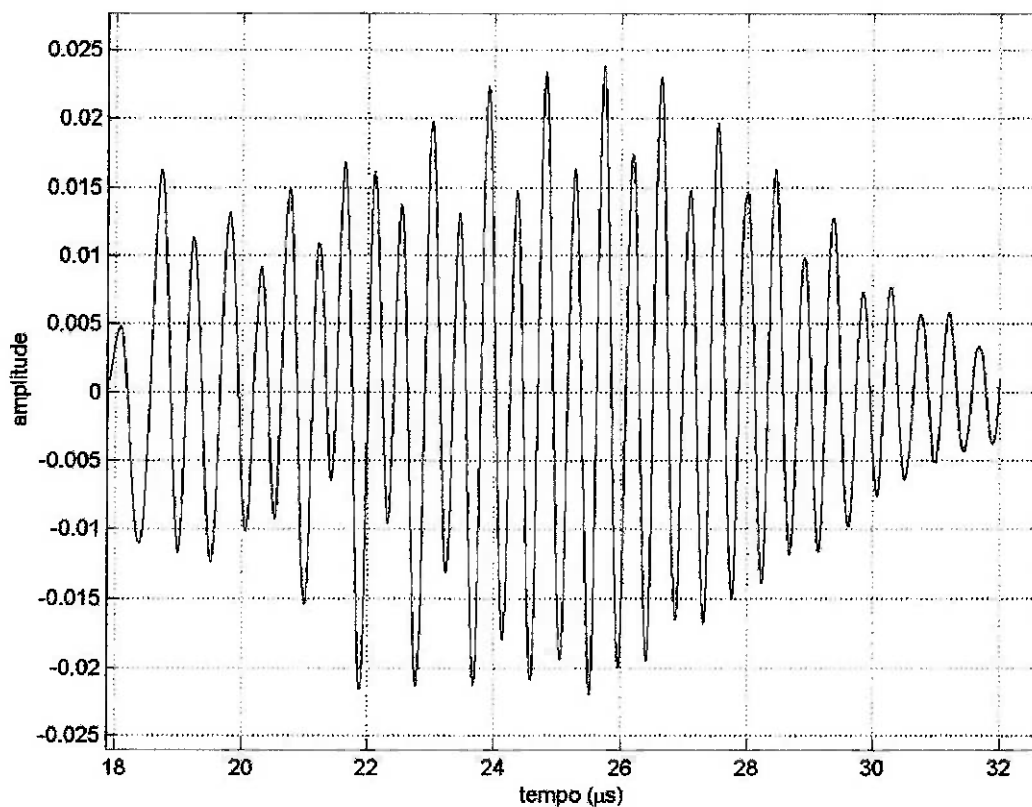


Fig. 99 - Sinal recebido para a chapa de 3 mm.

A Fig. 100 mostra o sinal recebido para a chapa de alumínio com espessura de 6 mm. Na Fig. pode-se ver a primeira onda refletida na interface (1) e a primeira que reflete na outra face do alumínio (2). Depois dessas ondas, não se consegue distinguir as outras ondas de reflexão interna no alumínio e no acrílico, que se misturam.

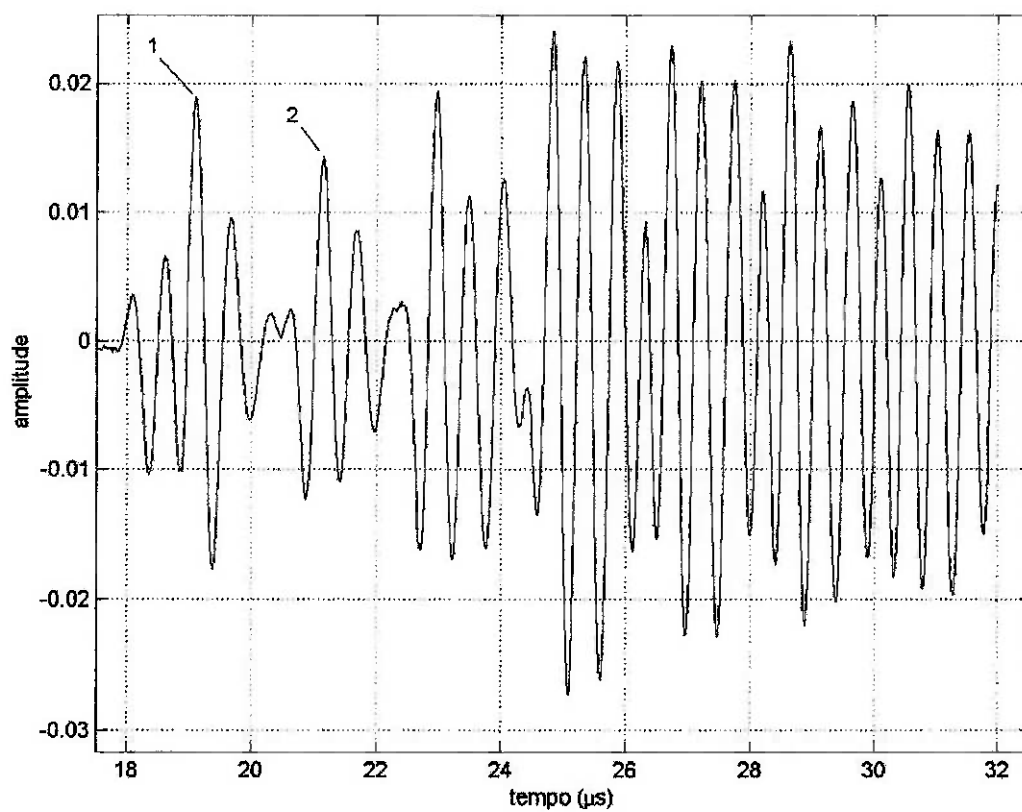


Fig. 100 - Sinal recebido para a chapa de 6 mm.

O sinal medido para a chapa de alumínio de 11 mm está mostrado na Fig. 101. Pode-se ver a primeira onda que reflete na interface (1) e a primeira que reflete no alumínio (2). Neste caso, também são mostradas as outras ondas de reflexão que se misturam.

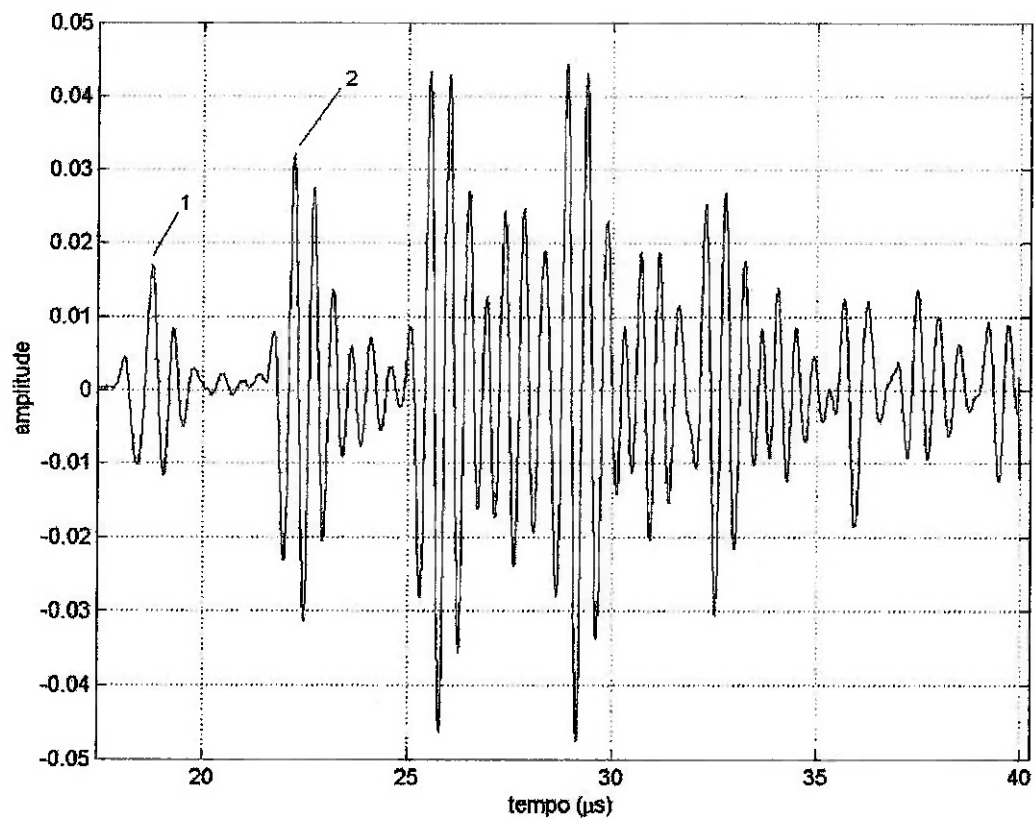


Fig. 101 - Sinal recebido para a chapa de 11 mm.

8 CONCLUSÕES

A comparação entre as Fig.s 82, 84, 90 e 92 mostra que a camada de matching casa melhor a impedância acústica da cerâmica com o meio, possibilitando maior transmissão de energia e um pulso mais estreito, aumentando assim a resolução do transdutor.

As Fig.s 89 e 96 mostram que o indutor casa melhor a impedância elétrica da cerâmica com o meio, aumentando a transmissão de potência como pode ser observado no aumento do pico da resposta impulsiva.

O modelo unidimensional teórico pode ser aplicado no projeto de um transdutor piezelétrico, visto que as curvas produzidas por esse modelo apresentam boa aproximação das curvas obtidas experimentalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREUCCI, R. Ensaio por Ultra-Som. Julho 2003.

BELASSIANO, E. Desenvolvimento de um Transdutor Ultra-Sônico Matricial Bidimensional para Aplicações Doppler. Setembro 2004.

E. E. FRANCO, M. A. B. ANDRADE, R. T. HIGUTI, J. C. ADAMOWSKI, F. BUIOCHI. Acoustic Transmission with mode conversion phenomenon, Proceeding of COBEM 2005 – 18th International Congress of Mechanical Engineering. MG, 2005.

GALDOS, A., OKUDA, H, YAGAWA, G. Finite element simulation of ultrasonic wave propagation in pipe and pressure vessel walls. 1990.

GALLEGO-JUÁREZ, J.A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. Madrid, 1989.

CHARACTERISTICS OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS. Disponível em <<http://www.nd-ted.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/characteristicspt.htm>>. Acesso em 17 jun. 2005

GREWE, M. G., GUARURAJA, T. R., SHROUT, T.R., NEWNHAM, R. E. Acoustic Properties of Particle/Polymer Composites for Ultrasonic Transducer Backing Applications. November 1990

HUNT, J. W., ARDITI, M. Ultrasound Transducers for Pulse-Echo Medical Imaging. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. BME-30, No. 8, 1983

LAMBERTI, N., GIUA, P. E., PAPPALARDO, M. Modello Matriciale e Suo Impiego Nell' Ottimizzazione Della Risposta Impulsiva Del Trasduttore Multielemento, 1987.

MURATA MANUFACTURING CO., Piezoelectric Ceramic Sensors (PIEZOTITE).

Disponível em <<http://www.murata.com/catalog/>>. Acesso em 17 jun. 2005

NADER, G. Desenvolvimento de Técnicas de Caracterização de Transdutores Piezelétricos. 2002.

SHIKATA, F. M. Transdutor Piezelétrico de Ultra-Som, 1997.

SILVA, E. C. N. Modelagem Vibracional de Transdutores de Ultra-Som Piezelétricos pelo Método de Elementos Finitos.

SIMON, C. Técnicas de Processamento Digital de Sinais Aplicados a Ensaios Não Destrutivos por Ultra-Som. 1993

TIMOSHENKO, S., GERE, J. Mecânica dos Sólidos, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1982

WOJCIK, G. L., VAUGHAN, D. K., ABOUD, N., MOULD, J. Eletromechanical Modeling Using Explicit Time-Domain Finite Elements