JIMMY ERNESTO SAN MIGUEL MEDINA

MODELAGEM DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR ULTRA-SOM UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

São Paulo
2005

JIMMY ERNESTO SAN MIGUEL MEDINA

MODELAGEM DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR ULTRA-SOM UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Controle e Automação Mecânica

Orientador:
Professor
Julio Cezar Adamowski

São Paulo
2005

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 27 de Janeiro de 2006.

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

San Miguel Medina, Jimmy Ernesto
Modelagem de ensaios não destrutivos por ultra-som utilizando o método dos elementos finitos / J.E. San Miguel Medina. – São Paulo, 2005.
127 p.

Edição Revisada de Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Transdutores 2.Propagação de ondas 3.Ensaios não destrutivos 4.Método dos elementos finitos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Aos meus Pais, Familiares e Amigos que foram um grande incentivo para a realização deste trabalho. Espero sinceramente, sempre poder causar momentos de felicidade à todos vocês.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Julio Cezar Adamowski, por ter acreditado em mim e ter me dado a oportunidade de obter o grau acadêmico de Mestre na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pelo apoio brindado durante todo o mestrado e a boa vontade de me ensinar neste período.

Ao Professor Flavio Buiochi, pela ajuda na correção de artigos, qualificação e dissertação, também pelo apoio brindado na etapa de modelagem e simulação deste trabalho.

Ao colega Marco Aurélio Brizzotti, por sempre ter me apoiado durante o mestrado, ajudando com o seu conhecimento tanto teórico como experimental, e por seu interesse para compartilhá-lo.

Aos colegas João e Daniel por ter colaborado com a correção de redação em português de trabalhos e artigos.

Aos meus Pais e familiares que sempre me apóiam, moral e afetivamente, obrigado por ter confiado em min e por ter me educado com esses valores e princípios que me servem tanto no dia a dia da vida.

Aos meus amigos, David, Carlos, Bruno, Jorge, Angel, Álvaro, Marta e Josiane por sempre ter me apoiado e me ajudado com seus conselhos e forças para seguir adiante durante períodos difíceis desse mestrado.

A minha noiva Karla que é a minha inspiração para chegar cada vez mais longe.

A agência de fomento à pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, por ter apoiado o aluno no desenvolvimento deste trabalho e à FINEP/CTPETRO pelo apoio à pesquisa sobre desenvolvimento de transdutores de ultra-som.

RESUMO

Os modelos existentes de propagação de ondas de ultra-som em meios líquidos e sólidos consideram a geração e recepção das ondas produzidas por transdutores simulados segundo o modelo do pistão plano ou com excitações cuja amplitude varia radialmente no pistão. Esses modelos são simplificados e não explicam completamente o comportamento real de transdutores de ultra-som interagindo com líquidos e sólidos. As verificações experimentais de propagação da onda de ultra-som em meios líquidos mostram que a onda de borda é diferente da onda plana. Observa-se também a existência de outras ondas não previstas nos modelos anteriores. Essas ondas são conhecidas como ondas *head*. A utilização do método dos elementos finitos (MEF) para a modelagem de propagação de ondas de ultra-som, incluindo o transdutor piezelétrico, permite a obtenção de resultados realísticos, conseguindo assim descrever com maior precisão o comportamento do transdutor e das ondas de ultra-som se propagando em diferentes meios e interagindo com defeitos que se comportam como refletores. Apesar disso, os resultados desses modelos dependem das características precisas dos materiais que compõem o transdutor. O transdutor de ultra-som é composto por uma cerâmica piezelétrica, por camadas de casamento e de retaguarda que geralmente são compósitos de epóxi com alumina e epóxi com tungstênio respectivamente, e pelo encapsulamento. Neste trabalho é analisada a resposta transiente de um transdutor circular de 2 MHz, com diâmetro de 12,7 mm, banda larga. O modelo do transdutor foi implementado com o método de elementos finitos. A análise transiente pelo MEF é implementada com o software ANSYS. Na primeira parte do trabalho o transdutor é analisado no modo de transmissão em água. Os resultados do modelo com MEF foram comparados com os resultados do modelo do pistão plano e com verificações experimentais obtidas em tanque de imersão com um hidrofone tipo agulha. Na segunda parte é realizada a análise do transdutor operando em modo pulso-eco radiando em peças de teste com e sem defeito, utilizando acoplamento direto e acoplamento por *buffer* de água. Os resultados do MEF apresentam boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente.

ABSTRACT

Simple models for ultrasonic wave propagation in liquid and solid media consider the wave generation and reception by transducers that behave as plane pistons. These models are simplified and they do not explain completely the behavior of an ultrasonic transducer when interacting with other media. Experimental verifications of ultrasonic wave propagation in liquid show that the pressure amplitude of the edge wave is different from the plane wave. Also it is observed the existence of other types of waves not foreseen in these previous models. These waves are known as *head* waves. More realistic models for ultrasonic wave propagation are obtained using the finite element method (FEM). These models include the piezoelectric transducer, thus, describing with higher precision the behavior of the transducer and the ultrasonic waves propagating in different mediums and interacting with defects. The precision of the models depends on the accurate determination of the mechanical and electrical properties of the involved materials. The ultrasonic transducer is composed by a piezoelectric ceramic, a matching layer and a backing layer that are generally made by epoxy/alumina and epoxy/tungsten composites respectively. In this work it is analyzed the transient response of a circular transducer of 12.7 mm diameter and 2 MHz center frequency. The transducer model was implemented with the finite element method. The FEM transient analysis was executed in the ANSYS software. In the first part of the work the transducer is analyzed in transmission mode in water and the MEF results are compared with the plane piston model and with experimental verifications using a hydrophone. In the second part it is carried at the transducer analysis operating in pulse-echo mode radiating into test pieces with and without defects, using direct and water buffer coupling. The MEF results show good agreement with the results obtained experimentally in the laboratory.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE SIMBOLOS
1. INTRODUÇÃO 1
1.1 Objetivos 4
1.2 Organização da Dissertação 4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 6
2.1 Piezeletricidade 6
2.1.1 Vetor Posição 6
2.1.2 Vetor Deslocamento 7
2.1.3 Tensor de Tensões 7
2.1.4 Tensor de Deformações 8
2.1.5 Vetor Deslocamento Elétrico 8
2.1.6 Vetor Campo Elétrico 8
2.1.7 Equações Constitutivas 8
2.2. Método Dos Elementos Finitos – Elemento Piezelétrico 11
2.3. Amortecimento de Rayleigh 15
3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR ULTRA-SOM (ENDUS) 19
3.1 Técnica Pulso-Eco 20
3.2. Transdutores Piezelétricos para Endus 21
3.3. Propriedades dos Materiais para Transdutores 25
3.3.1 Propriedades Acústicas 25
3.3.2 Propriedades Mecânicas 30
3.3.3 Confecção e teste de amostras para a camada de retaguarda do transdutor 31
3.3.4 Resultados experimentais das amostras para a camada de retaguarda 33
3.3.5 Construção do transdutor piezelétrico 36
3.4. Propagação da Onda Acústica 38
3.4.1 Modelos de Propagação em Líquidos 39
3.4.2 Modelos de Propagação em Sólidos 41
3.4.3 Modelo dos Ecos produzidos por pequenos refletores em meios líquidos 45
3.4.4 Modelo dos Ecos produzidos por pequenos refletores em meios sólidos 50
4. MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS 56
4.1 Modelagem de Líquidos e Líquidos com interface fluido/estrutura 56
4.2 Modelagem de Sólidos Isotrópicos 56
4.3 Modelagem da Cerâmica Piezelétrica 57
4.4 Convenção de Cores e Símbolos 57
5. RESULTADOS 59
5.1 Arranjo Experimental 59
5.2 Convergência Numérica 62
5.3 Simulação da Propagação em Líquidos 65
5.4 Simulação da Propagação em Sólidos 69
5.5 Modelos e Simulações para as amostras da camada de retaguarda 72
5.6 Modelo da cerâmica piezelétrica 74

5.7 Modelo do transdutor piezelétrico para ENDUS 76
5.8 Simulações de transmissão para o modelo do transdutor piezelétrico 78
5.9 Simulação de recepção para o modelo do transdutor piezelétrico 84
5.10 Simulações Pulso-Eco incluindo o transdutor piezelétrico 85
6. CONCLUSÕES E OBSERVAÇÕES 95
7. TRABALHOS FUTUROS 98
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99
ANEXOS 104

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema de Coordenadas. 7
Figura 2.2. Orientação das tensões em um elemento de volume infinitesimal. 7
Figura 2.3. Esquema do modelo de amortecimento de dois parâmetros..... 17
Figura 3.1. Técnica Pulso-Eco com buffer de água. 19
Figura 3.2. Transdutor de ultra-som para ENDUS. 22
Figura 3.3. Tensões num elemento sólido tridimensional e conversão de eixos para modelos axi-simétricos. 24
Figura 3.4. Ondas transmitidas na interface entre dois meios (KINSLER, 2000). 27
Figura 3.6. Arranjo dos transdutores e da amostra para medição de velocidades em tanque de imersão. 33
Figura 3.7. Densidade teórica e experimental das amostras confecçoadas em laboratório. 34
Figura 3.8. Velocidades longitudinal e transversal, dados teóricos e experimentais para as amostras preparadas em laboratório (Temp: 21ºC, Freq: 1 MHz). 34
Figura 3.9. Impedância Acústica longitudinal e transversal, dados teóricos e experimentais para as amostras preparadas no laboratório (Temp: 21ºC, Freq: 1 MHz). 35
Figura 3.10. Atenuação acústica experimental das amostras feitas no laboratório (Temp: 21ºC, Freq: 1 MHz). 35
Figura 3.11. Diagrama do transdutor montado em laboratório. 36
Figura 3.12. Transdutor de PZT5A de freqüência central 2 MHz montado em laboratório. 37
Figura 3.13. Transdutores de 2,25 MHz comercial e de 2 MHz montado em laboratório. 37
Figura 3.14. Formas de propagação de ondas de ultra-som. 39
Figura 3.15. Esquema das ondas plana e de borda de um pistão plano. 40
Figura 3.16. Forma de onda de pressão gerada em água por um transdutor de 2MHz num ponto no eixo e a 3mm da face do transdutor a) modelo do pistão plano b) verificações experimentais. 41
Figura 3.17. Frentes de onda irradiadas num meio sólido por um transdutor piezelétrico (BABOUX et al, 1992a). 42
Figura 3.18. Onda de velocidade gerada por um pistão plano de 12,7mm de diâmetro e freqüência 1MHz em aço a uma distância de 8mm da face do pistão e no eixo... 43
Figura 3.19. Representação esquemática da origem das ondas de borda (ILAN et al, 1990). 44
Figura 3.20. Geometria para a definição das regiões atingidas pelas ondas head (BABOUX et al, 1992a). 45
Figura 3.21. Ecos gerados por um refletor de tamanho 1λ em água no eixo do transdutor (WEIGHT et al, 1978). 46
Figura 3.22. Ecos gerados por um refletor de diâmetro 0,8mm em água a 10mm de distância do transdutor de 1MHz e 19mm de diâmetro, a) no eixo e b) 2mm fora do eixo. 47
Figura 3.23. Ecos gerados por um refletor de diâmetro 4mm em água a 10mm de distância do transdutor de 1MHz e 19mm de diâmetro, a) no eixo e b) 2mm fora do eixo. 48

Figura 3.24. Ecos gerados por um refletor de diâmetro 4mm em água para o transdutor de 1MHz e 19mm de diâmetro, no eixo e a) a 20mm de distância do transdutor e b) a 40mm de distância do transdutor. 49
Figura 3.25. Ondas irradiadas por um transdutor circular num sólido e ondas geradas pela reflexão produzida por um pequeno refletor (WEIGHT, 1993). 51
Figura 3.26. Eco gerado por um refletor num meio sólido no eixo do transdutor (WEIGHT, 1993). 52
Figura 3.27. Primeiros três ecos produzido pelas ondas refletidas por um refletor num meio sólido (WEIGHT, 1993). 53
Figura 3.28. Últimos quatro ecos produzido pelas ondas refletidas por um refletor num meio sólido (WEIGHT, 1993). 54
Figura 5.1. Esquema do arranjo experimental para medição da forma de onda do transdutor com excitação de pulso curto. 59
Figura 5.2. Esquema do arranjo experimental para medição da forma de onda do transdutor com excitação de um ciclo de seno. 60
Figura 5.3. Esquema do arranjo experimental para medição dos ecos produzidos das peças com e sem defeito utilizando o transdutor excitado com pulso curto. 60
Figura 5.4. Esquema das peças utilizadas para fazer as medições de pulso-eco. 61
Figura 5.5. Esquema do modelo axi-simétrico para simulação do pistão plano radiando em água. 62
Figura 5.6. Função de deslocamento para simular o pistão plano em líquidos. 63
Figura 5.7. Convergência Numérica segundo a discretização no espaço. 64
Figura 5.8. Convergência Numérica segundo a discretização no tempo. 65
Figura 5.9. Onda acústica no eixo e a 1,5mm de distância do transdutor de 2MHz e 12,7mm de diâmetro, a) modelo do pistão plano e b) modelo do ANSYS. 66
Figura 5.10. Onda acústica a 1,5mm fora do eixo e a 1,5mm de distância do transdutor, a) modelo do pistão plano e b) modelo do ANSYS. 67
Figura 5.11. Onda acústica se propagando em água na frente do pistão plano e a 4μs (ANSYS). 68
Figura 5.12. Formas de onda plana do pistão plano de 1 MHz, a 1,5mm de distância do pistão, para três valores de Δt na discretização no tempo. 69
Figura 5.13. Esquema do modelo axi-simétrico para simulação do pistão plano radiando em aço. 70
Figura 5.14. Função de pressão para simular o pistão plano em sólidos. 71
Figura 5.15. Onda acústica se propagando em aço, no eixo e a 5,0mm de distância do pistão plano (ANSYS). 71
Figura 5.16. Onda acústica se propagando em aço na frente do pistão plano a 1,6 μs (ANSYS). 72
Figura 5.17. Esquema do modelo das amostras da camada de retaguarda para simulação no ANSYS. 74
Figura 5.18. Curva de Atenuação em função do coeficiente de amortecimento para uma mistura de 25,7% de fração volumétrica de tungstênio. 74
Figura 5.19. Esquema do modelo da cerâmica piezelétrica para simulação no ANSYS. 75
Figura 5.20. Curva de Impedância Elétrica simulada e experimental para uma cerâmica PZT5A de 2MHz e β=5,3e-10. 75
Figura 5.21. Curva de Fase simulada e experimental para uma cerâmica PZT5A de 2 MHz e $\beta = 5{,}3\text{x}10^{-10}$. 76

Figura 5.22. Diagrama do modelo axi-simétrico do transdutor piezelétrico. 77
Figura 5.23. Diagrama do modelo axi-simétrico do transdutor piezelétrico acoplado ao meio líquido..... 78
Figura 5.24. Forma de onda de pressão no eixo acústico para um transdutor de 12,7mm de diâmetro e 2MHz numa distância de 1,5mm da superficie, a) modelo do pistão plano e b) modelo do ANSYS. 79
Figura 5.25. Forma de onda de pressão no eixo acústico para um transdutor de 12,7mm de diâmetro e 2MHz numa distância de 3,0mm da superfície, a) modelo do pistão plano e b) modelo do ANSYS. 80
Figura 5.26. Forma de onda de pressão 1,5mm fora do eixo acústico de um transdutor de 12,7mm de diâmetro e 2MHz numa distancia de 3,0mm da superfície, a) modelo do pistão plano e b) modelo do ANSYS. 81
Figura 5.27. Forma de onda de pressão experimental no eixo acústico do transdutor de 2MHz a 3,0mm da superfície excitado com sinal de pulso estreito. 82
Figura 5.28. Forma de onda de pressão experimental no eixo acústico do transdutor de 2MHz a 3,0mm da superfície excitado com sinal de um seno. 83
Figura 5.29. Modelo axi-simétrico para recepção do transdutor de ultra-som. 84
Figura 5.30. Forma de onda de voltagem gerada na recepção da onda acústica no modelo do transdutor no ANSYS. 85
Figura 5.31. Pulso estreito de excitação do transdutor. 86
Figura 5.32. Modelo axi-simétrico para simulação de pulso-eco com acoplamento direto para uma peça de alumino de 15,86mm de espessura. 86
Figura 5.33. Sinal do eco produzido por uma peça de alumínio de 15,86mm de espessura com transdutor de 2MHz, a) modelo do ANSYS e b) resultado experimental. 87
Figura 5.34. Sinal experimental do eco gerado por uma peça de alumínio de 15,86mm de espessura para o transdutor de 2,25 MHz. 88
Figura 5.35. Modelo para simulação de pulso-eco de uma peca de alumínio de espessura 34,7mm, em tanque de imersão. 89
Figura 5.36. Ecos experimentais gerados de uma peça de alumínio de 34,7 mm de espessura em tanque de imersão para o transdutor de 2,25 MHz. 89
Figura 5.37. Ecos gerados por uma peça de alumínio de 34,7 mm de espessura em tanque de imersão para o transdutor de 2 MHz, a) modelo do ANSYS e b) resultado experimental. 90
Figura 5.38. Modelo para simulação de pulso-eco de uma peca de alumínio com defeito e 32,1 mm de espessura e acoplamento direto. 91
Figura 5.39. Resultado experimental dos ecos gerados por uma peça de alumínio com defeito e 32,1 mm de espessura em acoplamento direto para o transdutor de 2,25 MHz. 92
Figura 5.40. Ecos gerados por uma peça de alumínio com defeito de 5 mm de diâmetro e 32,1 mm de espessura em acoplamento direto para o transdutor de 2 MHz a) modelo do ANSYS e b) resultado experimental. 93
Figura 5.41. Resultado experimental dos ecos gerados por uma peça de alumínio com defeito de 1,5mm de diâmetro e 30,31mm de espessura em acoplamento direto para a) transdutor de 2MHz e b) transdutor de 2,25MHz. 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Notação normal e reduzida para as constantes piezelétricas. 10
Tabela 3.1. Tabela de conversões para constantes elásticas. 24
Tabela 3.2. Propriedades do Araldite e tungstênio. 29
Tabela 3.3. Denotação dos ecos gerados por um refletor num meio sólido no eixo do transdutor. 55
Tabela 5.1. Propriedades para mistura de 25,7% de fração volumétrica de Tungstênio (Temp: 21º , Freq: 1MHz). 73
Tabela 5.2. Resumo dos parâmetros relevantes dos materiais usados no modelo. 77
Tabela 5.3. Parâmetros relevantes do alumínio usado na modelagem. 85

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathbf{x}$	Vetor Posição
$\mathbf{u}$	Vetor Deslocamento
$\hat{\mathbf{n}}$	Versor
$\mathbf{T}$	Tensor de tensões
$\mathbf{S}$	Tensor de deformações
ε_i	Alongamentos
γ_{ij}	Distorções
$\mathbf{D}$	Vetor deslocamento elétrico
$\mathbf{E}$	Vetor campo elétrico
ε	Permissividade elétrica
$\mathbf{e}$	Tensor de coeficientes piezelétricos
$\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathbf{S}}$	Tensor de permissividades elétricas medido com deformação constante
$\mathbf{c}^{\mathbf{E}}$	Tensor de rigidez medido com campo elétrico constante
t	Tempo
div	Operador matemático divergente
ϕ	Vetor de potencial elétrico
$[\mathrm{N}_u]$	Vetor da função de forma do deslocamento
$[\mathrm{N}_\phi]$	Vetor da função de forma do potencial elétrico
$\mathbf{u}_e$	Deslocamento do elemento
$\boldsymbol{\varphi}_e$	Potencial elétrico do elemento
$\mathbf{U}_e$	Vetor do deslocamento nodal
ϕ_e	Vetor do potencial elétrico nodal
$\left[\mathbf{K}^e_{uu}\right]$	Matriz de rigidez mecânica do elemento
$\left[\mathbf{K}^e_{u\phi}\right]$	Matriz de acoplamento piezelétrico do elemento
$\left[\mathbf{K}^e_{\phi\phi}\right]$	Matriz de rigidez dielétrica do elemento
$\left[\mathbf{M}^e_{uu}\right]$	Matriz de massa do elemento
$\left[\mathbf{C}^e_{uu}\right]$	Matriz de amortecimento do elemento
$\mathbf{F}$	Esforços mecânicos globais
$\mathbf{U}$	Deslocamentos globais
$\mathbf{Q}$	Cargas elétricas globais
$R(t)$	Função de dissipação de Rayleigh
$\dot{\mathbf{U}}$	Velocidade global
$\ddot{\mathbf{U}}$	Aceleração global
α , β	Constantes de Rayleigh
ζ_i	Coeficiente de amortecimento
ω_i	Freqüência angular natural do modo de vibrar i
ω_r	Freqüência angular de ressonância do modo de vibração
Q_m	Fator de qualidade mecânica
f	Freqüência central do transdutor
f_r	Freqüência de ressonância
f_{ar}	Freqüência de anti-ressonância

k_t	Coeficiente de acoplamento eletromecânico do modo espessura
k_p	Coeficiente de acoplamento eletromecânico do modo radial
C_W	Velocidade da onda de ultra-som em água
C_L	Velocidade longitudinal da onda de ultra-som
C_T	Velocidade transversal da onda de ultra-som
C_e	Velocidade extensional da onda de ultra-som
Z_W	Impedância acústica da água
Z_L	Impedância acústica longitudinal
Z_T	Impedância acústica transversal
ρ_W	Densidade da água
ρ , ρ_L , ρ_T	Densidade
α_W	Coeficiente de atenuação da água
α_L	Coeficiente de atenuação longitudinal
α_T	Coeficiente de atenuação transversal
T_L	Coeficiente de transmissão longitudinal
T_T	Coeficiente de transmissão transversal
A_0 , A_1	Amplitude pico a pico
$\boldsymbol{\theta c}$	Ângulo crítico
$\boldsymbol{\theta_I}$	Ângulo de incidência
$\boldsymbol{\theta_L}$	Ângulo de transmissão da onda longitudinal
$\boldsymbol{\theta_T}$	Ângulo de transmissão da onda transversal
d	Espessura
E	Modulo de Young
σ	Coeficiente de Poisson
λ , μ	Constantes de Lamé
λ	Comprimento de onda

1. INTRODUÇÃO

Ensaio não destrutivo por ultra-som (ENDUS) refere-se à inspeção de peças mecânicas quanto a defeitos provocados por corrosão, rachaduras, incrustações, bolhas, etc. (HIGUTI, 1994). O método consiste em enviar um pulso de ultra-som, que se propaga pela peça de teste, produzindo reflexões e gerando ecos. A recepção dos ecos é geralmente feita pelo mesmo transdutor que emitiu o pulso numa técnica denominada pulso-eco (ASM, 1992). Existem procedimentos bem definidos para cada tipo de defeito utilizando ondas longitudinais e transversais. As ondas transversais são geralmente utilizadas na detecção de rachaduras em tubos e vasos de pressão e defeitos em juntas soldadas. Ondas longitudinais são mais utilizadas na detecção de defeitos provocados por corrosão, incrustações e bolhas. Os princípios básicos destas técnicas de ENDUS são amplamente discutidos por Krautkrämer (KRAUTKRÄMER et al, 1990).

Os avanços nas técnicas de ENDUS dependem da utilização de sistemas computadorizados para aquisição e processamento de sinais, de transdutores adequados e de uma boa compreensão da propagação de ondas de ultra-som em sólidos. A detecção e classificação de defeitos podem ser feitas de forma automática através da utilização de um banco de dados contendo padrões de defeitos obtidos experimentalmente (CASE et al, 1996). Esse tipo de implementação exige um grande número de experimentos prévios com vários corpos de prova e transdutores com diferentes freqüências. Uma alternativa para este procedimento seria a montagem de um banco de dados com sinais obtidos através de simulações utilizando modelos de propagação em sólidos contendo defeitos. Os modelos mais genéricos são baseados em métodos de elementos finitos (SILVA et al, 1993a), (SILVA et al, 1993b) (ADAMOSKI et al 1994),(ADAMOWSKI et al, 1997) e (BUIOCHI et al, 1998). Esses modelos são complexos e para cada caso é necessário um longo tempo de processamento. Nas simulações de maior tamanho desenvolvidas neste trabalho, com 175000 elementos, o tempo de processamento foi ao redor de 8 horas.

Os modelos de propagação de ondas em líquidos e sólidos desenvolvidos por Weight (WEIGHT, 1984) e (WEIGHT, 1987), consideram a geração e recepção de ultra-som por transdutores que funcionam de acordo com o modelo de um pistão

plano (STEPANISHEN, 1971). Esses modelos prevêem dois tipos de ondas. Uma frente de onda plana que se propaga para frente, num cilindro imaginário que tem por base a superfície do pistão, e uma onda de borda originada pelo movimento relativo entre o pistão e a região que o circunda, essa onda é irradiada pela linha da borda e se propaga em toda a região frontal a partir da borda do pistão (WEIGHT, 1984).

A pressão da onda plana é proporcional à velocidade da face do pistão. A porção da onda de borda fora do cilindro imaginário na frente do pistão, tem a mesma fase que a onda plana, enquanto que a onda de borda dentro do cilindro encontra-se em oposição de fase em relação à onda plana. As verificações experimentais de propagação em água mostram que existem outros efeitos não previstos nos modelos baseados no pistão plano. Assim, os efeitos mais importantes estão relacionados à propagação de ondas radiais de compressão e superficial no disco de cerâmica piezelétrica do transdutor. A onda radial de compressão superficial gera uma onda cônica que se propaga inicialmente à frente das ondas de borda e alguns autores chamam de *Head Wave* (HAYMAN et al, 1979), (BABOUX et al, 1992a) que nesste trabalho serão chamadas de ondas *head*. Essa onda cônica se propaga próximo às ondas de borda provocando interferências. As características das ondas *head* estão relacionadas às propriedades do material piezelétrico do transdutor e também dependem da camada de retaguarda.

A propagação em sólidos é bem mais complicada que a propagação em líquidos e as verificações experimentais são bem mais difíceis de serem realizadas, devido à propagação de ondas de cisalhamento que não aparecem na propagação em líquidos. As ondas de borda e as *head* dão origem a ondas de cisalhamento devido à conversão de modos das ondas na interface transdutor/sólido ou liquido/sólido. As ondas de cisalhamento dependem do ângulo de incidência no sólido (BABOUX et al, 1992b). Os trabalhos mais importantes sobre a análise da propagação de ondas em sólidos para ENDUS, consideram a excitação produzida por um pistão plano ou excitação com variação radial de amplitude, mas sem variação de fase e, portanto não explicam completamente o comportamento do campo acústico e sua interação com descontinuidades ou defeitos no interior de um sólido. Em (WEIGHT, 1987) foi desenvolvido um modelo empírico para propagação em sólidos, como extensão do método de resposta impulsiva do pistão plano para propagação em líquidos. Esse

modelo calcula a forma de onda da velocidade da partícula. Ludwig e Lord (LUDWIG et al, 1988) apresentam um modelo de um transdutor com freqüência central de 1 MHz e 12,7 mm de diâmetro emitindo e recebendo ondas ultra-sônicas num bloco de alumínio. O modelo foi desenvolvido utilizando o método dos elementos finitos (MEF). O transdutor foi considerado como um pistão plano excitado por uma função obtida a partir do sinal elétrico recebido de um transdutor comercial. Em modelos com interface fluido/estrutura, a aplicação de pressão segundo um pistão plano produz modos espúrios devido à brusca variação de pressão na borda do pistão (STUCKY et al, 1998). Stucky e Lord (STUCKY et al, 1998), mostram a necessidade de utilizar uma função de distribuição de Fermi para produzir uma variação radial da pressão na região próxima à borda do pistão. Verifica-se assim, a necessidade de incluir um modelo mais realístico do transdutor piezelétrico no modelo de propagação em líquidos e sólidos.

No passado, o desenvolvimento de transdutores de ultra-som era feito de uma maneira muito empírica num processo de tentativa-erro. Esse tipo de procedimento consome muito tempo e aumenta os custos de produção (LERCH, 1990). Assim, para aprimorar o desenvolvimento dos transdutores utilizam-se modelagem e consequentemente simulação dos mesmos. Para tal objetivo, algumas ferramentas numéricas podem ser utilizadas para avaliar a resposta dos transdutores em situações específicas. Essas ferramentas também podem predizer com muita exatidão as características eletroacústicas dos materiais que formam o transdutor (PIRANDA et al, 2001). O propósito do estudo da modelagem e simulação dos transdutores é a otimização do projeto sem consumo de tempo em experimentos, para avaliar novos materiais no dispositivo e pesquisar sobre o comportamento acústico do mesmo.

A aplicação do método dos elementos finitos (MEF) ao problema mencionado acima é uma forma possível para obter simulações realísticas dos transdutores e assim poder avaliá-los interagindo em diferentes meios.

Os modelos desenvolvidos neste trabalho são implementados utilizando-se elementos finitos piezelétricos simulando o transdutor irradiando em água e no modo pulso-eco na inspeção de peças com e sem defeitos, com acoplamento de água em tanque de imersão ou com acoplamento direto. O modelo do transdutor é composto por uma cerâmica piezelétrica PZT5A, camada de casamento, camada de retaguarda

e o encapsulamento. O comportamento vibracional do transdutor é afetado pelas propriedades da cerâmica piezelétrica e dos materiais das camadas e difere do comportamento ideal do pistão plano (WEIGHT, 1984). Para a implementação dos modelos neste trabalho foi utilizando o software ANSYS. A discretização ótima foi determinada para as variáveis de tempo e espaço através de testes de convergência numérica para os modelos. A fim de validar os modelos, testes experimentais foram desenvolvidos utilizando um transdutor piezelétrico desenvolvido em laboratório com freqüência central de 2 MHz e um transdutor comercial de 2,25 MHz.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo explorar as técnicas de modelagem do transdutor piezelétrico, responsável pela geração e recepção das ondas de ultra-som, e sua interação em meios líquidos e sólidos visando aplicações em ensaios não destrutivos. Analisar as respostas experimentais de transmissão e pulso-eco de transdutores para ENDUS e compará-las com os modelos teóricos do pistão plano e dos elementos finitos. Validar a aproximação do MEF para o projeto de transdutores piezelétricos de ultra-som.

1.2 Organização da Dissertação

A dissertação está organizada em 8 capítulos, sendo o primeiro a introdução na qual são descritos brevemente os modelos para propagação de ondas de ultra-som, em sólidos e líquidos, existentes na bibliografia. Explica-se também a importância de modelos realísticos que possam descrever melhor o comportamento dos transdutores de ultra-som. O capítulo 2 apresenta a teoria da piezeletricidade mostrando as equações constitutivas na forma matricial e as equações de equilíbrio utilizadas no método dos elementos finitos para o cálculo do comportamento do transdutor piezelétrico. Mostra-se a aplicação do método dos elementos finitos para elementos piezelétricos e apresenta-se o equacionamento que o software ANSYS utiliza para o cálculo com esse tipo de elemento. Apresenta-se também uma introdução à teoria do amortecimento de Rayleigh, e mostra-se que o coeficiente de amortecimento é um fator determinante no comportamento vibracional de transdutores. A determinação

exata do valor desse coeficiente é muito importante para a modelagem dos transdutores. O capítulo 3 refere-se a ensaios não destrutivos por ultra-som, explicando brevemente o método do pulso-eco utilizado para a avaliação de peças na determinação de defeitos internos ou superficiais. Descrevem-se as principais características e propriedades do transdutor piezelétrico de ultra-som para ensaios não destrutivos. Apresenta-se a teoria básica para a determinação das propriedades acústicas e mecânicas dos materiais utilizados nos modelos implementados. Nesse capítulo são mostrados também os resultados obtidos das amostras construídas em laboratório para a camada de retaguarda do transdutor. É mostrada também a metodologia de construção do transdutor piezelétrico desenvolvido em laboratório. Desenvolve-se uma introdução à propagação da onda acústica em meios líquidos e sólidos, e sua interação com defeitos simulados por refletores planos. São apresentadas as formas de onda dos ecos produzidos por pequenos refletores nesses meios. O capítulo 4 mostra a metodologia da modelagem e a convenção de símbolos e cores dos modelos desenvolvidos neste trabalho. O capítulo 5 consiste na explicação dos arranjos experimentais utilizados neste trabalho. Esse capítulo inclui também os resultados obtidos com modelos implementados para simular a propagação da onda acústica em meios líquidos e sólidos. Esses modelos foram desenvolvidos para dois casos: simulando o transdutor como um pistão plano e simulando um transdutor piezelétrico real. Também são mostrados os resultados das simulações pulso-eco em peças com e sem defeito incluindo o transdutor piezelétrico. Todos os resultados foram comparados com verificações experimentais. Os capítulos 6, 7 e 8 apresentam as conclusões, trabalho futuro e bibliografia utilizada, respectivamente.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Piezeletricidade

A piezeletricidade descreve o fenômeno de geração de uma carga elétrica numa substância a qual é relacionada a uma tensão mecânica aplicada, e reciprocamente, uma mudança de dimensão relacionada a um campo elétrico aplicado (GALLEGO, 1989). Essas relações são expressas matematicamente pelas equações constitutivas dos materiais piezelétricos.

O efeito piezelétrico observado em materiais naturais, como por exemplo cristais de quartzo, apresenta uma resposta muito fraca. Assim, para obter melhores resultados foram desenvolvidos novos materiais conhecidos como cerâmicas piezelétricas, tais como: o Titanato de Bário (TiO_3Ba), o Metaniobato de Chumbo (PMN) e o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT). As cerâmicas piezelétricas são geralmente fabricadas por meio de processos de sinterização. Inicialmente os dipolos da cerâmica estão orientados de forma aleatória e portanto não apresentam o efeito piezelétrico, sendo necessário passar por um processo de polarização. O processo de polarização consiste em elevar a temperatura na cerâmica e aplicar um campo elétrico na direção e sentido desejados de polarização. Os dipolos elétricos vão se alinhando com a direção desse campo elétrico. Após a retirada do campo elétrico os dipolos estarão alinhados e dessa forma a cerâmica terá uma polarização permanente para qualquer tensão que produza um campo elétrico menor que o campo elétrico utilizado para alinhar todos os dipolos, caracterizando-o assim, como um material piezelétrico.

A seguir são apresentadas algumas definições e as equações fundamentais para materiais piezelétricos.

2.1.1 Vetor Posição

O vetor posição **x**, eq.(2.1), contém as coordenadas de um ponto no sistema de coordenadas da fig.2.1.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^{\mathrm{t}} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{t}} \tag{2.1}$$

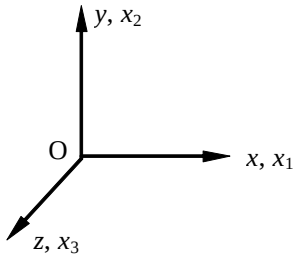


Figura 2.1. Sistema de Coordenadas.

2.1.2 Vetor Deslocamento

O vetor deslocamento **u**, eq.(2.2), é o vetor posição atual menos o vetor posição inicial.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_x & u_y & u_z \end{bmatrix}^{\mathrm{t}} = \begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{t}} \tag{2.2}$$

2.1.3 Tensor de Tensões

A tensão em um plano com normal definida pelo versor $\hat{\mathbf{n}}$ é calculada por $\mathbf{T} \cdot \hat{\mathbf{n}}$, onde **T** é o tensor de tensões, eq.(2.3) e fig.2.2. Somente as tensões nas direções 11, 12 e 13 estão indicadas; as tensões nas outras direções são obtidas por analogia.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{xy} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{xz} & T_{yz} & T_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{12} & T_{22} & T_{23} \\ T_{13} & T_{23} & T_{33} \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

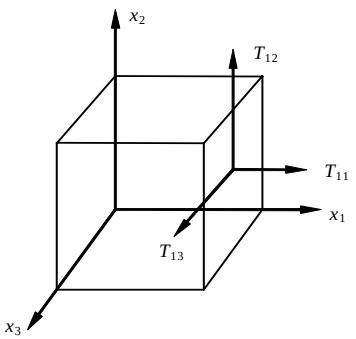


Figura 2.2. Orientação das tensões em um elemento de volume infinitesimal.

2.1.4 Tensor de Deformações

O tensor de deformações **S**, eq.(2.4a) e eq.(2.4b), relaciona-se com os alongamentos ε_i pela relação $\varepsilon_i = S_{ii}$, para *i*=1,2,3 e com as distorções γ_{ij} pela relação $\gamma_{ij} = 2S_{ij}$, para *i*,*j*=1,2,3 e i≠j.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} \tag{2.4a}$$

$$\text{onde } S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \qquad i,j=1,2,3 \tag{2.4b}$$

2.1.5 Vetor Deslocamento Elétrico

O divergente do vetor deslocamento elétrico **D**, eq.(2.5) é igual à densidade de cargas livres. Em um material isolante, *div***D**=0.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_x & D_y & D_z \end{bmatrix}^{\mathrm{t}} = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & D_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{t}} \tag{2.5}$$

2.1.6 Vetor Campo Elétrico

Em materiais dielétricos, o campo elétrico **E,** eq.(2.6), relaciona-se com o deslocamento elétrico pela relação **D**=ε **E,** onde ε é a permissividade elétrica do meio. O campo elétrico também é igual a menos o gradiente do potencial elétrico.

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x & E_y & E_z \end{bmatrix}^{\mathrm{t}} = \begin{bmatrix} E_1 & E_2 & E_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{t}} \tag{2.6}$$

2.1.7 Equações Constitutivas

As equações constitutivas, eq.(2.7a) e eq.(2.7b) que definem o comportamento de um material piezelétrico linear são dadas por (GALLEGO, 1989):

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^{\mathbf{E}}\mathbf{S} - \mathbf{eE} \tag{2.7a}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{eS} + \varepsilon^{\mathbf{S}}\mathbf{E} \tag{2.7b}$$

Onde, **e** é o tensor de coeficientes piezelétricos, $\varepsilon^{\mathbf{S}}$ o tensor de permissividades elétricas medido com deformação constante, e $\mathbf{c}^{\mathbf{E}}$ o tensor de rigidez medido com campo elétrico constante.

O comportamento elástico de um meio piezelétrico é governado pela segunda lei de Newton, dada por:

$$div\mathbf{T} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \tag{2.8}$$

Onde ρ é a densidade do material e **u** o vetor deslocamento.

O comportamento elétrico é descrito pela equação de Maxwell, considerando que o meio piezelétrico é isolante:

$$div\mathbf{D} = 0 \tag{2.9}$$

Utilizando a notação reduzida e considerando a classe de simetria 6mm do cristal piezelétrico, o comportamento eletromecânico de um material piezelétrico com simetria no plano *xy* e polarização na direção *z*, pode ser descrito como (BERLINCOURT, 1964):

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^{\mathbf{E}} & c_{12}^{\mathbf{E}} & c_{13}^{\mathbf{E}} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12}^{\mathbf{E}} & c_{11}^{\mathbf{E}} & c_{13}^{\mathbf{E}} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13}^{\mathbf{E}} & c_{13}^{\mathbf{E}} & c_{33}^{\mathbf{E}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44}^{\mathbf{E}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55}^{\mathbf{E}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66}^{\mathbf{E}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & e_{15} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \tag{2.10a}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^{S} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^{S} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \qquad (2.10b)$$

Nas equações acima, foi adotada a equivalência de índices da tabela 2.1.

Tabela 2.1. Notação normal e reduzida para as constantes piezelétricas.

Notação normal	**Notação reduzida**
xx	1
yy	2
zz	3
yz	4
xz	5
xy	6

As propriedades dos materiais piezelétricos são em geral medidas em peças de geometria simples, utilizando-se equações constitutivas lineares como as equações 2.7a e 2.7b e aplicando-se as devidas condições de contorno e de carregamento (ANSI, 1996). Dependendo da simetria do material, o número de constantes é reduzido, como mostrado pelas equações 2.10a e 2.10b. As tabelas de propriedades de materiais piezelétricos, fornecidas pelos fabricantes, geralmente não contêm todas as constantes necessárias para o modelo tri-dimensional, sendo necessário calcular ou fazer estimativas dos valores de algumas das constantes. O eixo *z* é geralmente utilizado como a direção da polarização em um material piezelétrico.

Em alguns casos as constantes fornecidas pelo fabricante são referentes a sistemas de equações constitutivas diferentes e devem ser convertidas por meio de relações simples (GALLEGO, 1989). Quando há simetria, somente as constantes absolutamente necessárias são mostradas. Embora os sistemas de equações constitutivas rearranjadas sejam equivalentes, a conversão de constantes dos materiais aumenta os erros provenientes das medições. As constantes de materiais

fornecidas pelos fabricantes são medidas em geral à temperatura ambiente, sob baixa solicitação.

No presente trabalho, utilizaram-se as constantes fornecidas pelo fabricante para desenvolver os modelos das cerâmicas piezelétricas do transdutor. Foram feitos ajustes dessas constantes a partir de verificações experimentais, esses ajustes estão relacionados principalmente ao amortecimento mecânico do material.

2.2. Método Dos Elementos Finitos – Elemento Piezelétrico

O MEF pode ser aplicado para resolver problemas que envolvem materiais piezelétricos a fim de se conhecer deslocamentos e potenciais elétricos gerados pela cerâmica, níveis de acoplamento entre X e Y, tensões mecânicas, etc. Para análise de materiais piezelétricos pelo MEF, faz-se necessário o estudo de três equações principais: equilíbrio, elétrica e constitutiva (NADER, 2002).

A equação de equilíbrio é obtida através da Segunda lei de Newton e pode ser expressa segundo a eq.(2.8) (NAILLON, 1983). Onde *div* é um operador dado por:

$$div = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

e **u** é o vetor de deslocamentos, expresso da seguinte maneira:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \tag{2.12}$$

A equação que modela a característica elétrica dos materiais piezelétricos é a equação de Maxwell, eq.(2.9). Onde *div***D** é o divergente do vetor deslocamento elétrico. Essa expressão indica que o valor das cargas elétricas no interior da cerâmica é zero (NAILLON, 1983). As duas equações acima, junto com a equação constitutiva de um material piezelétrico, serão resolvidas pela formulação do MEF.

Como está explicado nas referências (BATHE, 1996) e (OSTERGAARD et al, 1986) existem as seguintes relações nessa formulação:

$$\mathbf{S} = \left[\mathbf{B}_u\right]\mathbf{u} \tag{2.13}$$

$$\mathbf{E} = -\left[\mathbf{B}_\phi\right]\phi \tag{2.14}$$

Onde as matrizes [$\mathbf{B}_u$] e [$\mathbf{B}_\phi$] são dadas por:

$$[\mathbf{B}_u] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

$$\left[\mathbf{B}_\phi\right] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

A discretização dos materiais em elementos finitos cria uma malha modelada por muitos elementos individuais. Neste tipo de análise é necessário determinar os graus de liberdade nos nós de cada elemento: potencial elétrico e o deslocamento mecânico. Assim, o deslocamento $\mathbf{u}_e$ e o potencial elétrico φ_e são aproximados para cada elemento, sendo dados por:

$$\mathrm{u}_e = \left[\mathbf{N}_u\right]^T \mathrm{U}^e \tag{2.17}$$

$$\varphi_e = \left[\mathrm{N}_{\phi}\right]^T \phi^e \tag{2.18}$$

$[\mathbf{N_u}]$ é o vetor da função de forma do deslocamento e $[\mathbf{N}_{\phi}]$ é o vetor da função de forma do potencial elétrico. $[\mathbf{N_u}]$ e $[\mathbf{N}_{\phi}]$ são funções interpoladoras (em geral são iguais), $\mathbf{U}^e$ é o vetor de deslocamento nodal para um elemento e ϕ^e é o vetor de potencial elétrico nodal para um elemento e podem ser descritos como:

$$\mathrm{U}^e = \begin{Bmatrix} U_{x1} \\ U_{y1} \\ U_{x2} \\ U_{y2} \\ \vdots \\ U_{xi} \\ U_{yi} \end{Bmatrix} \quad ; \quad \phi^e = \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_i \end{Bmatrix} \tag{2.19}$$

O índice *i* representa o número de nós de cada elemento.

Aplicando o princípio variacional nas eq.(2.7a) e eq.(2.7b), obtém-se o sistema de equações de elementos finitos para as equações constitutivas de um material piezelétrico, escrita nos termos do deslocamento $\mathbf{U}^e$ e do potencial elétrico ϕ^e de cada elemento da malha (NAILLON, 1983) , (SILVA, 1993a):

$$\left[\mathrm{M}^e_{uu}\right]\ddot{\mathrm{U}}^e + \left[\mathrm{C}^e_{uu}\right]\dot{\mathrm{U}}^e + \left[\mathrm{K}^e_{uu}\right]\mathrm{U}^e + \left[\mathrm{K}^e_{u\phi}\right]\phi^e = \mathrm{F}^e + \mathrm{F}^e_i \tag{2.20}$$

$$\left[\mathrm{K}^e_{uu}\right]\mathrm{U}^e + \left[\mathrm{K}^e_{\phi\phi}\right]\phi^e = \mathrm{Q}^e + \mathrm{Q}^e_i \tag{2.21}$$

onde:

$$\left[\mathbf{K}^e_{uu}\right] = \iiint_{\Omega e} \left[\mathbf{B}^e_u\right]^T \left[\mathbf{c}^{\mathbf{E}}\right] \left[\mathbf{B}^e_u\right] dV \tag{2.22}$$

sendo $\left[\mathbf{K}_{uu}^{e}\right]$ a matriz de rigidez mecânica do elemento.

$$\left[\mathbf{K}_{u\phi}^{e}\right]=\iiint_{\Omega e}\left[\mathbf{B}_{u}^{e}\right]^{T}\left[\mathbf{e}\right]\left[\mathbf{B}_{\phi}^{e}\right]dV \tag{2.23}$$

sendo $\left[\mathbf{K}_{u\phi}^{e}\right]$ a matriz do acoplamento piezelétrico do elemento.

$$\left[\mathbf{K}_{\phi\phi}^{e}\right]=\iiint_{\Omega e}\left[\mathbf{B}_{\phi}^{e}\right]^{T}\left[\varepsilon^{\mathbf{S}}\right]\left[\mathbf{B}_{\phi}^{e}\right]dV \tag{2.24}$$

sendo $\left[\mathbf{K}_{\phi\phi}^{e}\right]$ a matriz de rigidez dielétrica do elemento.

$$\left[\mathbf{M}_{uu}^{e}\right]=\rho\iiint_{\Omega e}\left[\mathbf{N}_{u}\right]^{T}\left[\mathbf{N}_{u}\right]dV \tag{2.25}$$

sendo $\left[\mathbf{M}_{uu}^{e}\right]$ a matriz de massa do elemento.

$$\left[\mathbf{C}_{uu}^{e}\right]=\alpha^{e}\iiint_{\Omega e}\rho\left[\mathbf{N}_{u}\right]^{T}\left[\mathbf{N}_{u}\right]dV+\beta^{e}\iiint_{\Omega e}\left[\mathbf{B}_{u}\right]^{T}\left[\mathbf{c}^{\mathbf{E}}\right]\left[\mathbf{B}_{u}\right]dV \tag{2.26}$$

E finalmente $\left[\mathbf{C}_{uu}^{e}\right]$ é a matriz de amortecimento do elemento.

Finalmente, a solução completa para elementos finitos piezelétricos é descrita matematicamente por uma série de equações diferenciais de estrutura simétrica. Assim, os valores globais dos esforços mecânicos são expressos como **F**, os deslocamentos como **U** e as cargas elétricas como **Q**. As eq.(2.20) e eq.(2.21) podem ser rearranjadas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix}\left[\mathbf{M}_{uu}\right] & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{\mathbf{U}}\\ \ddot{\phi}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}\left[\mathbf{C}_{uu}\right] & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{\mathbf{U}}\\ \dot{\phi}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}\left[\mathbf{K}_{uu}\right] & \left[\mathbf{K}_{u\phi}\right]\\ \left[\mathbf{K}_{u\phi}\right]^{T} & \left[\mathbf{K}_{\phi\phi}\right]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\mathbf{U}\\ \phi\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\mathbf{F}\\ \mathbf{Q}\end{Bmatrix} \tag{2.27}$$

2.3. Amortecimento de Rayleigh

A formulação da equação que governa o movimento de um sistema é descrita pelas matrizes de massa, rigidez e amortecimento. Dessas, as duas primeiras matrizes são de fácil cálculo e também podem ser obtidas experimentalmente. Predizer os parâmetros de vibração com respeito ao amortecimento é muito difícil na prática. A resposta dinâmica de um sistema e sua atenuação à vibração, é predominantemente controlada pelo amortecimento.

Existem muitas hipóteses disponíveis na literatura que se baseiam num sistema simples de um grau de liberdade e são estendidos a sistemas de vários graus de liberdade. Assim, para sistemas de um grau de liberdade, as teorias de amortecimento são bem conhecidas e podem se classificar como: amortecimento viscoso, amortecimento Coulomb e amortecimento estrutural.

Um amortecedor mecânico é geralmente idealizado como um elemento de amortecimento viscoso, nessa teoria a força de amortecimento é assumida como proporcional à velocidade relativa entre as duas extremidades do sistema. Já para a teoria do amortecimento Coulomb o amortecimento é causado pelo movimento relativo de duas superfícies se deslizando uma contra a outra. Finalmente o amortecimento estrutural é utilizado para modelar a dissipação de energia de elementos contínuos (LIU et al, 1995).

Todos esses tipos de amortecimentos mencionados podem ser aplicados também a sistemas de vários graus de liberdade, o mais utilizado é o amortecimento viscoso pela boa aproximação e fácil cálculo. Assim, no modelo do amortecimento viscoso a força de amortecimento é linearmente proporcional à velocidade e a função de dissipação de Rayleigh toma a forma:

$$R(t) = \frac{1}{2}\iiint_V \mu\, \dot{\mathbf{U}}^2(x,y,z,t)dv + \frac{1}{2}\sum \mathbf{C}^e_{uu}\dot{\mathbf{U}}^2(x,y,z,t) \tag{2.28}$$

A eq.(2.28), relaciona μ que é o coeficiente de dissipação de energia, os fatores de amortecimento e o deslocamento mecânico para os quais a discretização

normal dos elementos finitos produz um conjunto de equações diferenciais de segunda ordem. Assim a equação de movimento de um sistema dinâmico linear pode ser representada como:

$$[\mathbf{M}_{uu}]\{\ddot{\mathbf{U}}\}+[\mathbf{C}_{uu}]\{\dot{\mathbf{U}}\}+[K_{uu}]\{\mathbf{U}\}=\{\mathbf{F}\} \tag{2.29}$$

As propriedades do amortecimento de sistemas variam de acordo com o projeto estrutural e as propriedades do material ou materiais utilizados no projeto do sistema. Na análise da resposta dinâmica de qualquer sistema os dados do amortecimento são essenciais para obter resultados satisfatórios. A formulação mais comum do amortecimento de Rayleigh pode ser utilizada no domínio do tempo e apresenta uma aproximação muito boa nos resultados. Essa teoria assume que a matriz de amortecimento $[\mathbf{C}_{uu}]$ consiste numa combinação linear da matriz de massa $[\mathbf{M}_{uu}]$ e a matriz de rigidez $[\mathbf{K}_{uu}]$:

$$[\mathbf{C}_{uu}]=\alpha[\mathbf{M}_{uu}]+\beta[\mathbf{K}_{uu}] \tag{2.30}$$

Onde α e β são as constantes de Rayleigh para a massa e a rigidez respectivamente. A vantagem do uso do amortecimento de Rayleigh consiste em que o cálculo dos autovalores e autovetores ou da resposta calculada torna-se assim muito simplificada.

O primeiro e segundo termos da eq.(2.30) indicam que o coeficiente de amortecimento é inversamente e linearmente proporcional a freqüência, respectivamente, fig.4.1. Assim, uma formulação simples entre o coeficiente de amortecimento ζ_i e a freqüência natural angular ω_i do modo de vibração *i* é dada por (PONS et al, 2004):

$$\zeta_i=\frac{2\alpha}{\omega_i}+\frac{\beta}{2}\omega_i \tag{2.31}$$

Existem quatro casos de amortecimento físico: sem amortecimento (α=0, β=0), amortecimento viscoso (α=0, β>0), amortecimento proporcional à massa (α>0, β=0) e amortecimento de Rayleigh (α>0, β>0) (NADER, 2002). A determinação das constantes α e β depende das características de dissipação de energia. Geralmente essas constantes são calculadas a partir dos coeficientes de amortecimento ζ_i calculados em dois valores de freqüência de ω_i.

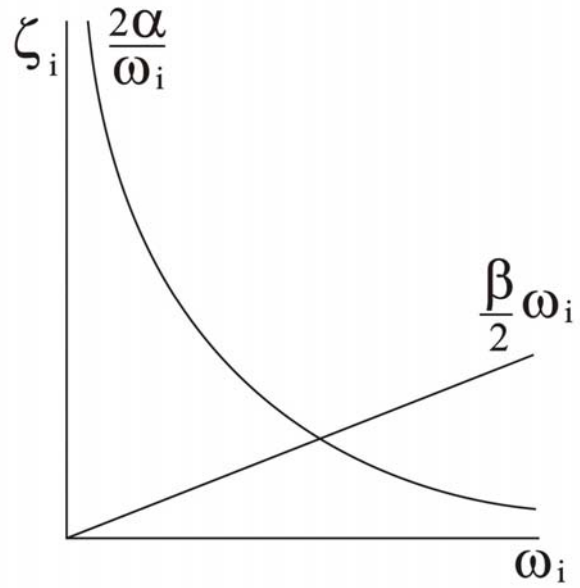


Figura 2.3. Esquema do modelo de amortecimento de dois parâmetros.

Na prática, muitos materiais apresentam uma estrutura com amortecimento puramente viscoso (α=0). Nesse caso, a constante β pode ser calculada de valores conhecidos de ζ_i e de ω_i.

$$\beta = \frac{2\zeta_i}{\omega_i} \tag{2.32}$$

Na freqüência de ressonância ω_r o valor de β pode ser calculado pela eq.(2.33):

$$\beta = \frac{1}{\omega_r Q_m} \tag{2.33}$$

Onde ω_r é a freqüência angular de ressonância do modo de vibração em análise e Q_m é o fator de qualidade mecânica. O fator de qualidade mecânica para um material piezelétrico é definido pela análise da impedância elétrica, como segue:

$$Q_m = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \tag{2.34}$$

Onde f_r é a freqüência de ressonância e f_1 e f_2 são as freqüências para as quais as amplitudes da curva de impedância caem 3dB do valor de ressonância.

No ANSYS, o amortecimento para materiais piezelétricos pode ser definido pela constante β utilizando a eq.(2.33). Para materiais não piezelétricos o amortecimento também pode ser relacionado com o mesmo coeficiente já que este está relacionado com a atenuação da onda acústica se propagando no material. Para ambos os casos ajustaram-se os valores de amortecimentos de acordo com valores experimentais de atenuação ou da impedância elétrica.

3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR ULTRA-SOM (ENDUS)

O entendimento das interações da onda elástica de ultra-som com os defeitos é uma característica essencial na identificação de defeitos (DATTA et al, 1996). Os ensaios não destrutivos podem ser definidos como uma maneira indireta de se verificar a integridade de peças ou estruturas através da interação entre estas e alguma forma de energia, sem que haja necessidade de danificá-las. Dessa maneira, pode-se avaliar uma peça, determinando se está danificada ou não (HIGUTI, 1994).

No caso do método de ENDUS, ondas de ultra-som de elevada freqüência (alguns MHz) são introduzidas no material para a detecção de defeitos na superfície e no interior do material. As ondas de ultra-som viajam através do material com uma conseqüente perda de energia chamada atenuação e são refletidas nas interfaces ou descontinuidades. A onda refletida é visualizada e analisada para definir a presença e localização de defeitos e também para realizar medição de espessuras (ASM, 1992).

Existem dois métodos principais para as técnicas de ENDUS, que são os passivos e os ativos. No método passivo, o transdutor capta os sinais provenientes da peça em teste, nesse método a fonte de energia acústica é a mesma peça. No método ativo a fonte de energia acústica é o transdutor. Neste último método existem três técnicas: Transmissão, Reflexão e Pulso-eco (HIGUTI, 1994). Neste trabalho desenvolvem-se modelos de ENDUS para a técnica de pulso-eco em tanque de imersão ou com buffer de água e com acoplamento direto.

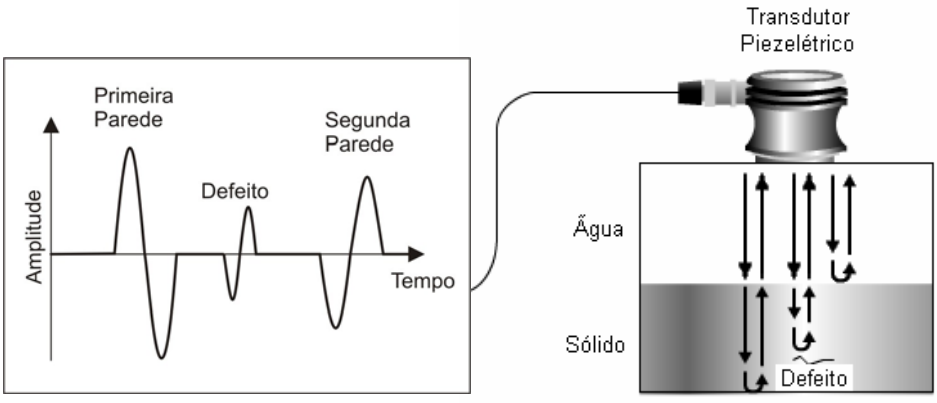


Figura 3.1. Técnica Pulso-Eco com buffer de água.

3.1 Técnica Pulso-Eco

Na técnica pulso-eco, um pequeno pulso de onda de ultra-som é enviado para o objeto em teste em intervalos de tempos periódicos. Os ecos são gerados pelas ondas refletidas dos defeitos, descontinuidades ou interfaces, fig.3.1. A proporção de energia refletida depende muito do tamanho da superfície de reflexão em relação ao comprimento da onda de ultra-som incidente. A direção do feixe refletido depende da orientação da superfície de reflexão em relação ao feixe incidente. A energia refletida é monitorada de duas maneiras: a quantidade de energia refletida numa direção específica, e o tempo entre o pulso inicial transmitido e a recepção do eco. Nessa técnica um só transdutor atua como emissor e receptor das ondas (ASM, 1992).

Quando se deseja mostrar uma imagem da peça inspecionada usando a técnica de pulso-eco, as formas mais tradicionais de apresentação dos dados são os chamados:

- A-Scan

É basicamente uma plotagem da amplitude dos ecos recebidos versus o tempo. Os dados são obtidos num ponto determinado da superfície da peça em teste. Esta técnica é a mais usada para analisar o tipo, tamanho e localização dos defeitos. O tamanho dos defeitos pode ser estimado comparando a amplitude do sinal do eco recebido com a amplitude de um sinal do eco de um defeito com tamanho e forma conhecidos. Nesse processo deve-se ter em conta as perdas por atenuação segundo as distâncias de localização dos defeitos. A posição do defeito pode ser determinada conhecendo o tempo em que ocorre o eco e a velocidade de propagação da onda de ultra-som no material.

- B-Scan

Essa técnica mostra quantitativamente os dados obtidos numa linha reta da peça em teste. O resultado é uma plotagem do tempo versus a distância, onde a distância representa a posição do transdutor ao longo da linha na superfície da peça. Os resultados dessa plotagem podem ser interpretados como a área transversal da peça no plano da linha de inspeção, mostrando as interfaces e defeitos ou refletores dentro da peça. Assim, dando uma idéia de posição, orientação e profundidade dos mesmos.

- C-Scan

Nessa técnica os ecos obtidos dos refletores internos da peça são gravados em função da posição de cada refletor numa área determinada. Assim os defeitos são mostrados numa vista plana da peça conseguindo determinar o tamanho da área do defeito e a posição dele no plano analisado. Processando os sinais recebidos, pode-se também obter uma plotagem que represente a profundidade dos defeitos segundo uma convenção de cores para as distâncias desde o plano analisado até o transdutor.

3.2. Transdutores Piezelétricos para Endus

As cerâmicas piezelétricas são os materiais mais utilizados para a fabricação de transdutores de ultra-som para aplicações em ensaios não destrutivos. Elas desempenham a função de conversão de energia mecânica para energia elétrica e vice-versa. Os transdutores para ENDUS apresentam pulsos curtos (tipicamente de três ou quatro ciclos) e freqüências na faixa de 0,5 até 50 MHz. Transdutores de banda larga são necessários para aplicações onde se necessita uma elevada resolução axial e para a medição de velocidades e atenuações numa faixa contínua de freqüências. Estes transdutores são utilizados para produzir e/ou receber um sinal que pode servir para detectar um obstáculo, medir uma quantidade física ou medir a condição de algum sistema. As aplicações mais comuns são de detecção, medição e controle ou visualização.

Um transdutor de ultra-som para ENDUS, fig.3.2, é composto principalmente por elementos ativos e elementos passivos. O elemento ativo é a cerâmica piezelétrica vibrando em modo espessura, responsável por originar a onda de ultra-som. No presente trabalho utiliza-se cerâmicas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT5A). Os materiais piezelétricos são selecionados pelas perdas mecânicas e dielétricas; sensibilidade à temperatura, esforços mecânicos e à excitação elétrica; taxa de envelhecimento; características físicas, químicas; temperatura de Curie; etc. Um parâmetro importante dos materiais piezelétricos é o coeficiente de acoplamento eletromecânico, que pode ser definido pela raiz quadrada da razão entre a energia disponível na forma elétrica (ou mecânica) e a energia mecânica produzida (ou elétrica). Sendo um número adimensional, pode ser utilizado com vantagens na

comparação entre as capacidades de conversão de energia de diferentes cerâmicas, porém não define diretamente a eficiência, pois não está relacionada às perdas (GALLEGO, 1989).

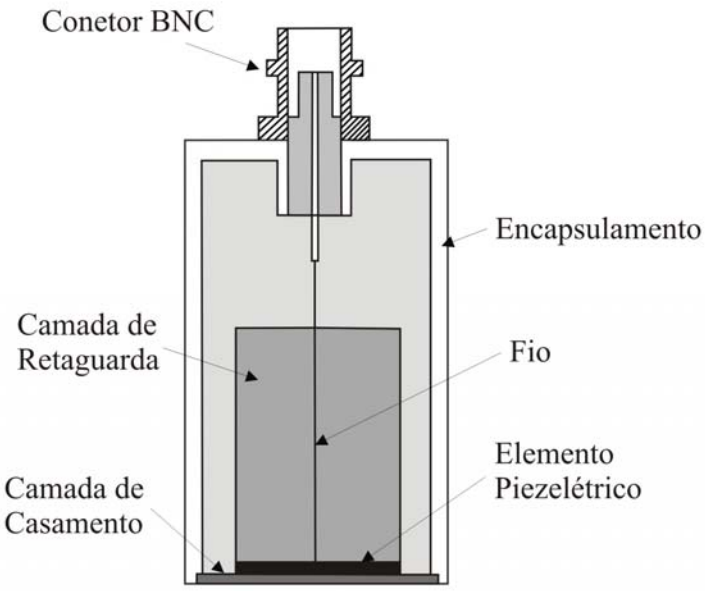


Figura 3.2. Transdutor de ultra-som para ENDUS.

São definidos vários coeficientes de acoplamento eletromecânico de acordo com os modos de vibrar da cerâmica piezelétrica. Os coeficientes mais utilizados em materiais piezelétricos para transdutores aplicados em ENDUS são os coeficientes de espessura (k_t) e planar ou radial (k_p). Sendo desejável um elevado valor para o coeficiente k_t e um baixo valor para o k_p. A vibração radial da cerâmica produz ondas indesejáveis que dificultam o entendimento e interpretação dos sinais recebidos. O coeficiente de acoplamento eletromecânico no modo espessura está relacionado às freqüências de ressonância e anti-ressonância, segundo a expressão:

$$k_t = \sqrt{\frac{f_{ar}^{\,2} - f_r^{\,2}}{f_{ar}^{\,2}}} \tag{3.1}$$

Além dessa característica, é importante ter um baixo fator de qualidade mecânica Q_m, pois essa característica torna a resposta em freqüência com banda

larga. Esse comportamento é desejável em transdutores para ENDUS, apesar de diminuir a sensibilidade.

Entre os materiais passivos encontram-se a camada de casamento e a camada de retaguarda. A primeira é encarregada de melhorar o acoplamento entre o transdutor e o meio onde se propaga a onda. E a segunda é utilizada para absorver a onda que se propaga para trás da cerâmica, a qual pode gerar reflexões criando ruído ou interferência no sinal de recepção do transdutor. São geralmente fabricadas a partir de misturas de resina epóxi com alumina para a camada de casamento e de mistura de resina epóxi e tungstênio para a camada de retaguarda. Tem-se também o encapsulameto encarregado de proteger o transdutor de ruídos eletromagnéticos e do meio onde é utilizado.

O fato de acoplar um material de perda na retaguarda da cerâmica ajuda a gerar um pulso mais curto, porém, reduz a sensibilidade do transdutor. A utilização de uma camada de casamento na parte frontal da cerâmica reduz o comprimento do pulso sem perder sensibilidade (WANG et al , 2001). Nas aplicações de alta freqüência para ensaios não destrutivos por ultra-som, geralmente, é necessário limitar o número de períodos no pulso gerado pelo transdutor. Por esse motivo utiliza-se um material para camada de retaguarda que possua grande absorção acústica e com impedância acústica parecida à impedância da cerâmica (BAR-COHEN et al, 1984) (ASSAAD et al, 1996). Nesses transdutores a espessura da cerâmica está relacionada à freqüência central do transdutor e o seu diâmetro está relacionado com a diretividade do campo acústico produzido. Outra característica importante dos transdutores piezelétricos é o conhecido “ring”, que representa o tempo desde que um pulso é aplicado para que o transdutor comece a vibrar até que amorteça completamente. O “ring” depende do tipo de cerâmica e da camada de retaguarda utilizados no transdutor. Assim por exemplo, cerâmicas dos tipos PZT4 e PZT8 com elevado fator de qualidade mecânica e portanto, um baixo coeficiente de amortecimento possuem um “ring” maior. Cerâmicas como PZT5A e PZT5H apresentam um fator de qualidade mecânica moderado e portanto um “ring” menor. As camadas de retaguarda que atenuam o sinal ajudam a encurtar o ring.

O software ANSYS possibilita a modelagem de materiais piezelétricos utilizando o método dos elementos finitos de acordo com a teoria linear da

piezeletricidade. O material piezelétrico é modelado como um material ortotrópico. Assim sendo, deve se tomar o cuidado de definir as constantes elásticas, piezelétricas e dielétricas de maneira correta, isto é, observando os eixos principais do material.

Tabela 3.1. Tabela de conversões para constantes elásticas.

Elemento axi-simétrico do ANSYS	**Convenção para materiais piezelétricos**
C_{11}	c_{11}
C_{22}	c_{33}
C_{33}	$c_{22} = c_{11}$
C_{44}	c_{66}
C_{55}	$c_{55} = c_{44}$
C_{66}	c_{44}

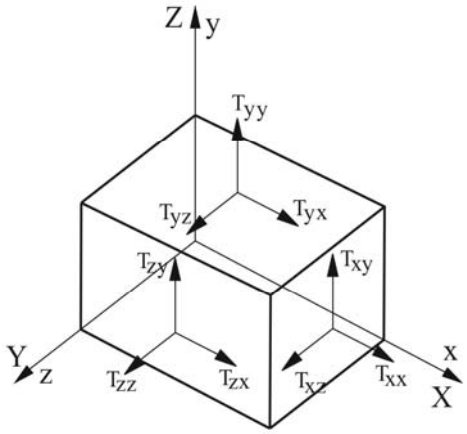


Figura 3.3. Tensões num elemento sólido tridimensional e conversão de eixos para modelos axi-simétricos.

No caso dos transdutores circulares, o modelo é simplificado considerando o problema com simetria axial. As cerâmicas utilizadas na construção dos transdutores de ultra-som têm simetria no plano XY e são polarizadas no eixo Z, de acordo com as definições do padrão IEEE (ANSI, 1996). As duas faces do disco piezelétrico (plano XY) são metalizadas para formar os dois eletrodos da cerâmica. No software ANSYS adota-se o eixo Y como eixo de simetria em modelos axi-simétricos. Assim sendo, é necessário fazer uma conversão das constantes elásticas, piezelétricas e dielétricas na utilização de modelos axi-simétricos. O eixo Z da cerâmica se transforma no eixo Y do sistema de coordenadas do ANSYS. Os eixos X e Y da cerâmica se transformam em eixos X e Z do sistema de coordenadas do ANSYS,

como mostrado no desenho esquemático da figura 3.3. Essa figura também mostra as tensões mecânicas atuantes num sólido tri-dimensional no sistema de coordenadas do ANSYS.

As conversões das constantes elásticas são mostradas na tabela 3.1. As mesmas conversões devem ser aplicadas às constantes piezelétricas e dielétricas. Os materiais PZT5A considerados nesse trabalho têm simetria em torno do eixo Z, isto é, são considerados isotrópicos nas direções X e Y. Porém, tem-se: $c_{44} = c_{55}$, $c_{11} = c_{22}$, $c_{11}-c_{12} = 2c_{66}$.

3.3. Propriedades dos Materiais para Transdutores

3.3.1 Propriedades Acústicas

A velocidade, impedância e atenuação da onda acústica são as três propriedades acústicas mais importantes dos materiais utilizados nas aplicações de ultra-som. Os materiais utilizados nas camadas de casamento e de retaguarda para transdutores de ultra-som são materiais compostos formados por uma matriz de polímero com partículas de algum material que ajude a modificar suas propriedades. Assim, idealmente para a camada de casamento é necessário um material que tenha uma impedância acústica intermediária entre a cerâmica e o meio onde se propaga a onda, para conseguir que a maior parte do pulso emitido pelo transdutor seja transmitido ao meio. Já para a camada de retaguarda, precisa-se um material que apresente uma impedância acústica parecida com a da cerâmica para assegurar um bom acoplamento, e uma grande atenuação para evitar as reflexões (MARTHA et al, 1990). A impedância acústica para materiais de camadas de retaguarda de cerâmicas piezelétricas geralmente encontra-se na faixa entre 2 e 30 MRayls, dependendo do projeto do transdutor.

Um aspecto importante a se considerar nas características de atenuação dos compósitos utilizados na fabricação de transdutores são as propriedades da matriz de polímero e das partículas. Assim, em polímeros a atenuação depende do grau de cristalinidade, apresentando uma relação inversa entre ambas. Já para sólidos metálicos ou cerâmicos, a não homogeneidade no material causa dispersão das ondas acústicas, de maneira similar, as partículas misturadas no polímero causam dispersão

contribuindo na atenuação da onda. Essa contribuição depende do tamanho das partículas no polímero.

Existem duas técnicas principais para a medição e caracterização das propriedades acústicas de materiais sólidos, são: a espectroscopia por ultra-som e o método de freqüência discretizada (WANG et al, 2001). Para ambas, ajustando o ângulo de incidência do feixe acústico, o efeito de conversão de modos permite a medição das propriedades das ondas longitudinais e transversais no sólido.

Para o método da freqüência discretizada utiliza-se um gerador de pulsos, com um tempo de duração suficiente para que a freqüência central seja bem definida. São utilizados dois transdutores iguais e montados coaxialmente, um deles funciona como emissor e um outro como receptor. A freqüência de ressonância dos transdutores é igual à freqüência central de interesse. Uma amostra de espessura *d*, a qual tem que ser medida para se obter suas propriedades acústicas, é colocada entre os transdutores (WU, 1996).

Assim, medem-se dois sinais, um na ausência da amostra no meio dos transdutores e outro com a presença da amostra. Comparando-se a diferença do tempo entre os sinais recebidos, a velocidade longitudinal pode ser calculada segundo a eq.(3.2):

$$c_L = \frac{c_W}{1 + \Delta t \cdot c_W / d} \tag{3.2}$$

Onde c_W representa a velocidade do som na água, c_L a velocidade longitudinal do som na amostra, e Δt a diferença de tempo da onda longitudinal transmitida para atingir o receptor entre os sinais com e sem amostra.

Esse método mede a velocidade de grupo na freqüência central, mas como muitos materiais usados na freqüência de 1 até 10 MHz apresentam baixa dispersão, então a velocidade de fase é aproximadamente igual à velocidade de grupo (WU, 1996).

Ainda para medir o coeficiente de atenuação da onda longitudinal α_L, as amplitudes pico a pico recebidas do sinal de voltagem com amostra A_0 e sem amostra A_1 são necessárias para o cálculo. Então, conhecendo-se as impedâncias acústicas da

água $Z_W = \rho_W \cdot c_W$ (onde ρ_W é a densidade da água) e a impedância acústica da amostra $Z_L = \rho_L \cdot c_L$ (onde ρ_L é a densidade da amostra), o coeficiente de atenuação pode ser calculado segundo a eq.(3.3), em dB/cm:

$$\alpha_L = \alpha_w + \frac{\log_{10}\left(T_L \cdot A_1 / A_0\right)}{5d} \tag{3.3}$$

Onde d é a espessura da amostra e T_L é o coeficiente de transmissão da amostra que se define pela eq.(3.4):

$$T_L = \frac{4 \cdot Z_W \cdot Z_L}{\left(Z_W + Z_L\right)^2} \tag{3.4}$$

A atenuação da água α_w é dada pela eq.(3.5) em dB/cm (WANG et al, 2001):

$$\alpha_w = 0{,}00271 \cdot f^2 \tag{3.5}$$

Onde f é a freqüência central de operação dos transdutores que estão realizando a medição.

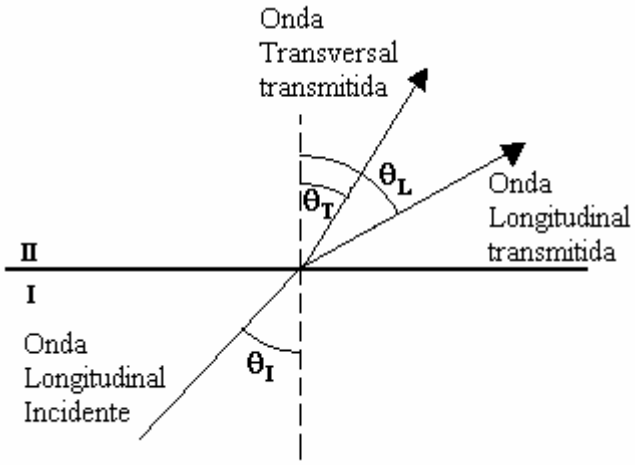


Figura 3.4. Ondas transmitidas na interface entre dois meios (KINSLER, 2000).

Para medir a velocidade transversal da amostra deve-se conhecer o ângulo crítico da onda longitudinal, que determina o ângulo no qual deve incidir a onda emitida na peça em teste para que a onda longitudinal dentro da peça desapareça. A partir desse ângulo o receptor somente receberá o sinal da onda transversal. Na fig.3.4 observa-se a onda incidente longitudinal no meio I. Essa onda atinge a interface com um ângulo θ_I conhecido como ângulo de incidência. Aparecem no meio II duas ondas transmitidas, uma longitudinal e outra transversal. Cada uma delas com um ângulo em relação ao eixo perpendicular à interface, θ_L e θ_T respectivamente.

O ângulo da onda longitudinal transmitida θ_L, para o qual essa onda desaparece no receptor é igual a 90^o. Levando em conta essa condição tem-se a seguinte relação para o ângulo critico $\boldsymbol{\theta_C}$:

$$\boldsymbol{\theta_C} = \arcsin\left(\frac{C_L^{\,II}}{C_L^{\,I}}\right) \tag{3.6}$$

Para medir o sinal da onda transversal transmitida, o ângulo de incidência da onda longitudinal θ_I precisa ser maior que o ângulo crítico $\boldsymbol{\theta_C}$. Dessa forma pode-se considerar que o sinal recebido pertence somente a onda transversal na amostra. Uma vez determinado o ângulo de incidência, procede-se a fazer medições sem e com amostra na posição de medição de onda transversal (WU, 1996).

O cálculo necessário para obter o valor da onda transversal segue a eq.(3.7) que relaciona o ângulo de incidência, a velocidade de propagação na água, a espessura da amostra e a diferença de tempos entre os sinais com e sem amostra.

$$C_T = \frac{C_W}{\sqrt{\sin^2\boldsymbol{\theta_I} + \left(\frac{\Delta t \cdot C_W}{d} + \cos\boldsymbol{\theta_I}\right)^2}} \tag{3.7}$$

No cálculo da atenuação para a onda transversal da eq.(3.8) precisa-se o valor do coeficiente de transmissão para a onda transversal T_T.

$$\alpha_T = \alpha_w \cdot \cos(\boldsymbol{\theta}_\mathbf{T} - \boldsymbol{\theta}_\mathbf{I}) + \sqrt{1 - \left(C_T \sin \frac{\boldsymbol{\theta}_\mathbf{I}}{C_W} \right)^2} \cdot \frac{\log_{10}(T_T \cdot A_1 / A_0)}{5 \cdot d} \tag{3.8}$$

Assim, o coeficiente de transmissão T_T pode ser calculado segundo (WU, 1996) como $T_T = |T_1\ T_2|$, os valores de T_1 e T_2 podem-se obter pelas seguintes relações:

$$T_1 = \frac{-2\rho_W Z_{\ln}}{\rho_T} \frac{\sin(2\boldsymbol{\theta}_\mathbf{T})}{Z_{\ln} \cos^2(2\boldsymbol{\theta}_\mathbf{T}) + Z_{tn} \sin^2(2\boldsymbol{\theta}_\mathbf{T}) + Z_{wn}} \tag{3.9}$$

$$T_2 = \frac{\tan \boldsymbol{\theta}_\mathbf{I}}{2 \sin \boldsymbol{\theta}_\mathbf{T}} \left(1 - \frac{Z_{\ln} \cos^2(2\boldsymbol{\theta}_\mathbf{T}) - Z_{tn} \sin^2(2\boldsymbol{\theta}_\mathbf{T}) + Z_{wn}}{Z_{\ln} \cos^2(2\boldsymbol{\theta}_\mathbf{T}) + Z_{tn} \sin^2(2\boldsymbol{\theta}_\mathbf{T}) + Z_{wn}} \right) \tag{3.10}$$

Onde:

$$Z_{wn} = \frac{Z_W}{\cos \boldsymbol{\theta}_\mathbf{I}}\ ,\ Z_{\ln} = \frac{Z_L}{\cos \boldsymbol{\theta}_\mathbf{L}},\ \ Z_{tn} = \frac{Z_T}{\cos \boldsymbol{\theta}_\mathbf{T}},\ Z_T = \rho_T \cdot C_T \tag{3.11}$$

Os três ângulos são relacionados pela Lei de Snell:

$$\sin \frac{\boldsymbol{\theta}_\mathbf{I}}{C_W} = \sin \frac{\boldsymbol{\theta}_\mathbf{L}}{C_L} = \sin \frac{\boldsymbol{\theta}_\mathbf{T}}{C_T} \tag{3.12}$$

No presente trabalho se desenvolve uma técnica para a fabricação das amostras da camada de retaguarda do transdutor, na qual se utilizam como materiais: Epoxy (Araldite) e Tungstênio em pó. Esta técnica é detalhada no item 3.3.3.

Na tabela 3.2, são apresentadas as propriedades dos materiais utilizados.

Tabela 3.2. Propriedades do Araldite e tungstênio.

	ρ (kg/m^3)	C_L (m/s)	C_T (m/s)	Z_L (MRayl)	Z_T (MRayl)
Araldite	1087,14	2195,7	1040,7	2,38	1,13
Tungstênio	19400	5233	2860	101,52	55,48

3.3.2 Propriedades Mecânicas

A onda longitudinal que se propaga ao longo de uma barra fina é chamada de onda extensional. A velocidade dessa onda é dada pela eq. (3.13) (KINO, 2000):

$$C_e = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{3.13}$$

Onde E é o módulo de Young e ρ é a densidade do material. Geralmente a velocidade da onda extensional é menor que a velocidade da onda longitudinal.

O coeficiente de Poisson σ é um coeficiente que representa a relação entre a compressão transversal e a expansão longitudinal de uma barra fina submetida a uma tensão axial longitudinal estática. Esse coeficiente é definido pela eq.(3.14) (KINO, 2000):

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \tag{3.14}$$

Onde λ e μ são as constantes de Lamé, que são parâmetros utilizados para determinar a energia total acumulada pelo sistema, e se encontram relacionados com as constantes elásticas do material.

As velocidades das ondas extensionais C_e e longitudinais C_L estão relacionadas pela eq.(3.15). As velocidade das ondas extensionais estão relacionadas com as velocidades das ondas transversais C_S, pela eq.(3.16) (KINO, 2000):

$$C_e = \sqrt{\frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{1-\sigma}} C_L \tag{3.15}$$

$$C_S = \sqrt{\frac{1}{2(1+\sigma)}} C_e \tag{3.16}$$

Substituindo (3.15) em (3.16) tem-se o coeficiente de Poisson em função das velocidades longitudinal e transversal, eq.(3.17):

$$\sigma = \frac{0.5 - \left(\frac{C_S}{C_L}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_S}{C_L}\right)^2} \tag{3.17}$$

Portanto, medindo-se as velocidades longitudinal e transversal do som se propagando dentro de um material isotrópico determinam-se suas constantes elásticas E e σ.

3.3.3 Confecção e teste de amostras para a camada de retaguarda do transdutor

Os materiais utilizados para a confecção das amostras foram: ARALDITE, resina adesiva epóxi com tempo de cura de 24 horas da BRASCOLA Ltda. e Tungstênio 26751-1 em pó, com diâmetro das partículas de 12 μm da ALDRICH Chemical Company. No procedimento de confecção das amostras, foram misturadas diferentes quantidades volumétricas de epóxi e tungstênio para se conseguir uma variação na fração de volume do tungstênio no compósito, numa faixa de 0 até 26,8%. A mistura foi submetida ao vácuo por 15 minutos para expulsar as bolhas de ar internas. Em seguida, a mistura é colocada em moldes cilíndricos e depois numa estufa a 50°C de temperatura durante duas horas para acelerar o tempo de cura. Finalmente as amostras são deixadas à temperatura ambiente durante 12 horas.

Depois de confeccionadas, as amostras são caracterizadas através do cálculo e medição de sua densidade, impedância acústica, atenuação e velocidades de propagação longitudinal e transversal da onda de ultra-som. A base para a realização destes experimentos foi o artigo de Wu (WU, 1996).

O esquema do tanque de provas junto com o sistema de geração e aquisição de sinais é mostrado na fig.3.5. Foram utilizados dois transdutores com freqüência

central de 1 Mhz e diâmetro de 19 mm. O emissor é excitado por pulsos curtos gerados pelo Pulsador/Receptor da Panametrics modelo 5072PR com energia 13 μJ, amortecimento de 1 Ω e taxa de repetição de 100 Hz. O sinal do receptor foi recebido pelo mesmo Pulsador/Receptor e foi atenuado em -20 dB. Esse sinal foi adquirido no osciloscópio Hewllet Packard modelo Infimun 500 MHz 2 Gsa/s. É possível programar os parâmetros de aquisição como o delay, a sensibilidade e a taxa de aquisição. Para reduzir o nível de ruídos foi utilizada uma média aritmética de 64 aquisições. Os sinais recebidos foram de 5009 pontos, com um período de amostragem $4x10^{-9}$ s. O osciloscópio é conectado a um PC através de uma placa de rede para transmitir os dados. O software MATLAB é usado para o processamento digital dos dados. A velocidade do som nas amostras é calculada em base da variação de tempo dos sinais utilizando correlação cruzada, como na referência (HIGUTI, 2002).

Para o cálculo das propriedades das amostras, utilizaram-se programas desenvolvidos em MATLAB que se encontram nos anexos (ANEXO2 – ANEXO5). No sinal recebido do osciloscópio é aplicada a transformada rápida de Fourier para determinar a amplitude na freqüência central dos transdutores. Na fig.3.6 se observa o arranjo dos transdutores e a amostra no momento da medição. Durante as medições precisa-se ter em conta o paralelismo e alinhamento dos transdutores com a amostra para obter resultados ótimos. As amostras desenvolvidas foram usinadas no torno para obter superfícies paralelas em ambos os lados da mesma.

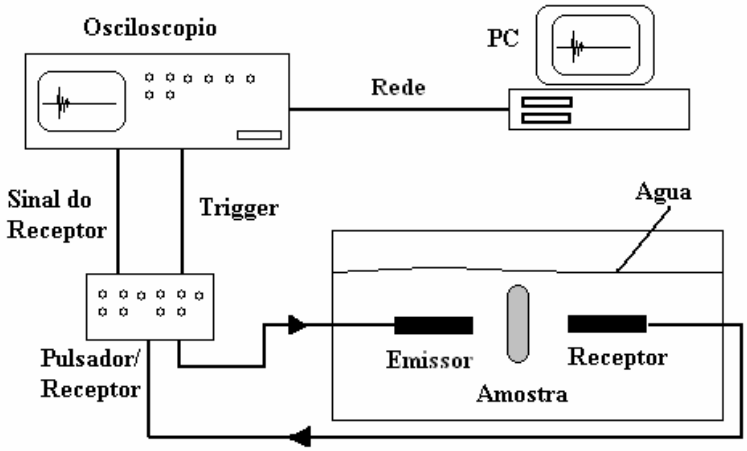


Figura 3.5. Esquema de medição experimental de amostras com ultra-som.

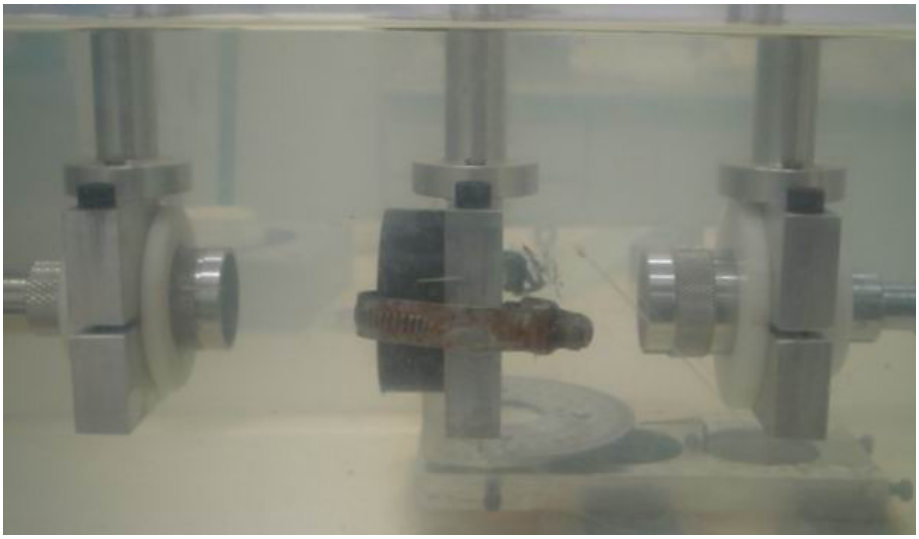


Figura 3.6. Arranjo dos transdutores e da amostra para medição de velocidades em tanque de imersão.

3.3.4 Resultados experimentais das amostras para a camada de retaguarda

Foram preparadas 19 amostras da mistura de resina epóxi com tungstênio (FRANCO et al, 2005). Os resultados obtidos das medições realizadas foram comparados com os resultados do modelo de Sayers (SAYERS et al, 1984), o código foi implementado em MATLAB e encontra-se no ANEXO2.

Na fig.3.7 apresentam-se os resultados obtidos da medição das densidades realizada mediante la relação entre a espessura e o diâmetro das amostras, a variação é linear e apresenta uma boa aproximação em relação aos resultados experimentais. Na fig.3.8, são mostrados os resultados das medições experimentais das velocidades de propagação longitudinal comparadas com as obtidas do modelo teórico, também são mostradas as velocidades transversais teóricas do modelo. Os resultados ficam muito próximos do comportamento teórico, o que indica o bom processo de fabricação das amostras.

Na fig.3.9 são apresentadas as curvas de impedância acústica teórica e experimental. Nos três gráficos apresentados até agora se verifica uma pequena variação para a amostra número 3, que tem uma fração volumétrica de 1,59% se acredita que seja por defeitos internos provocados por bolhas de ar que ficaram aprisionadas durante a cura da amostra.

Na fig.3.10 são apresentadas as atenuações acústicas de cada amostra, verifica-se que a amostra 3 fica fora da tendência da curva. Outro ponto que mostra o mesmo comportamento é o referente à última amostra com fração volumétrica de 26,80 % de tungstênio, esse tipo de comportamento pode ser gerado devido a problemas na fabricação de amostras com altas quantidades de tungstênio.

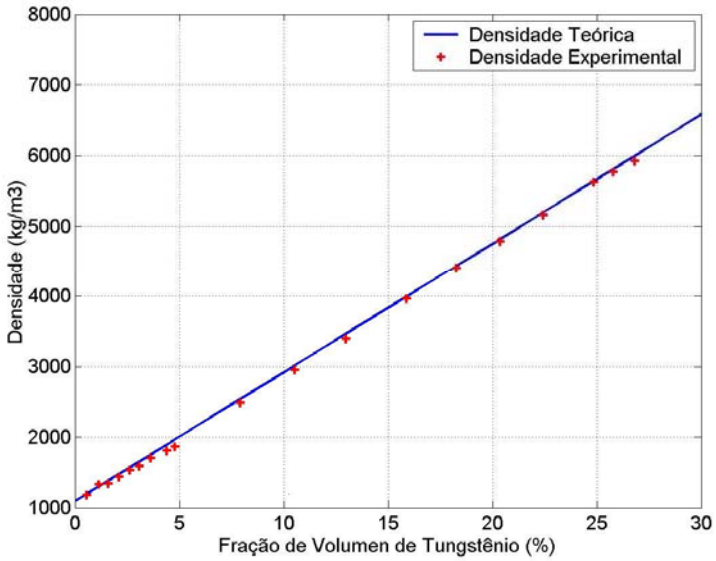


Figura 3.7. Densidade teórica e experimental das amostras confecçoadas em laboratório.

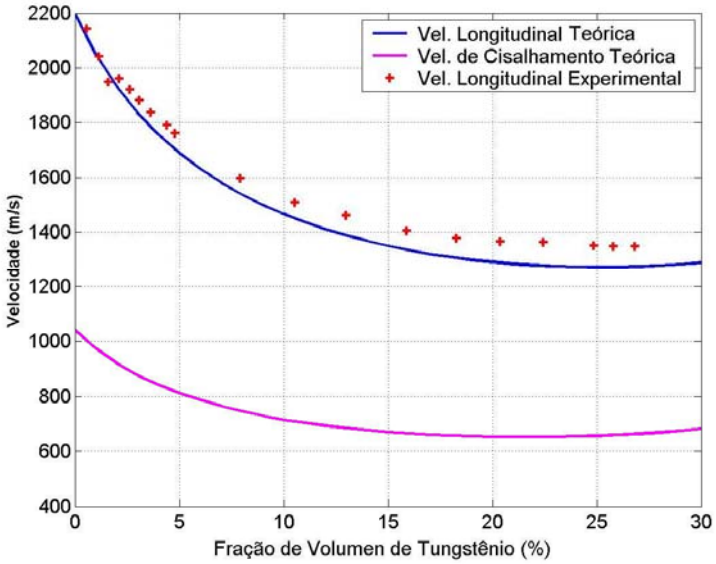


Figura 3.8. Velocidades longitudinal e transversal, dados teóricos e experimentais para as amostras preparadas em laboratório (Temp: 21ºC, Freq: 1 MHz).

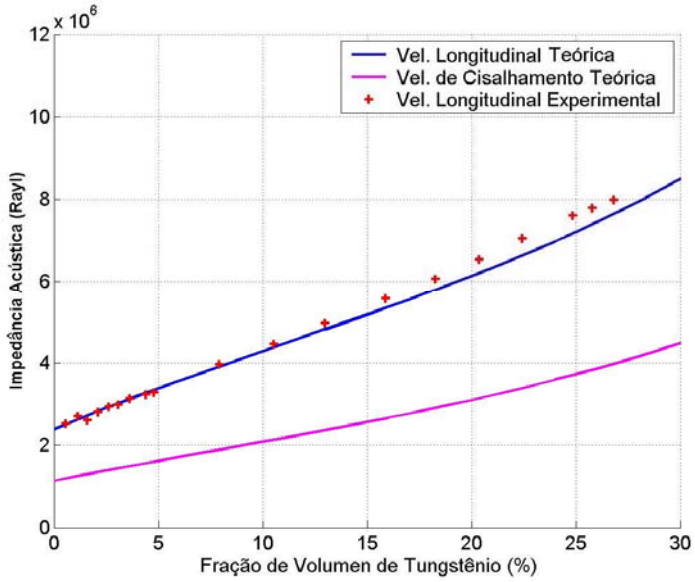


Figura 3.9. Impedância Acústica longitudinal e transversal, dados teóricos e experimentais para as amostras preparadas no laboratório (Temp: 21ºC, Freq: 1 MHz).

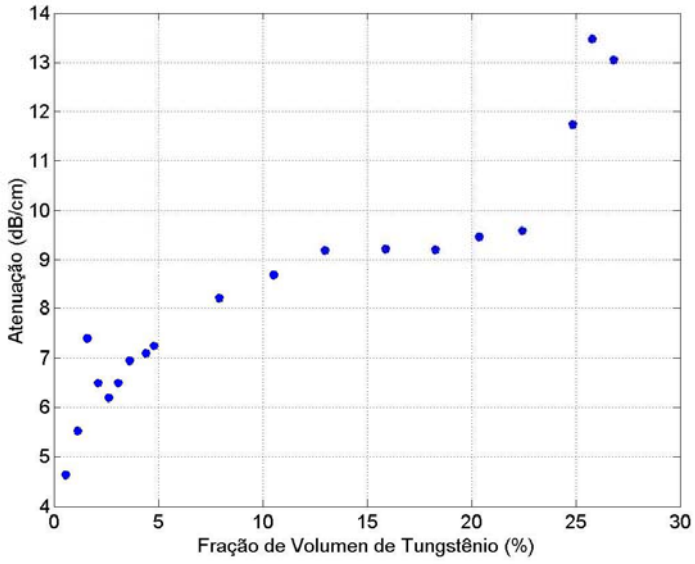


Figura 3.10. Atenuação acústica experimental das amostras feitas no laboratório (Temp: 21ºC, Freq: 1 MHz).

Devido à grande quantidade de massa de tungstênio, maior que a massa da resina, a mistura se torna muito viscosa de forma que aumenta a dificuldade de se conseguir uma mistura homogênea. Além disso, forma-se uma grande quantidade de bolhas de ar aprisionadas no compósito. Acredita-se então que esses problemas produzam um resultado “mascarado” nas amostras de alta fração volumétrica de tungstênio.

De forma geral, as propriedades dos materiais obtidas por cálculos segundo os resultados experimentais apresentam boa concordância com o modelo teórico, e portanto, podem ser utilizadas na modelagem através do método dos elementos finitos. Para o transdutor desenvolvido neste trabalho se utiliza a mistura com maior valor de atenuação que equivale a 25,7% de fração volumétrica de tungstênio.

3.3.5 Construção do transdutor piezelétrico

A fig.3.11 mostra o diagrama esquemático do transdutor de ultra-som construído no laboratório. O elemento ativo é a cerâmica piezelétrica PZT5A com eletrodos em ambas as faces. O diâmetro da cerâmica de 12,7mm, espessura de 0,97mm e freqüência central de 2MHz.

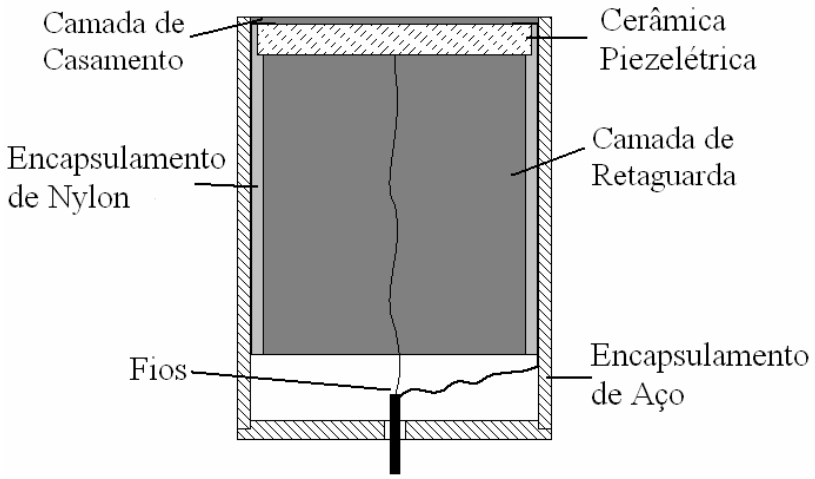


Figura 3.11. Diagrama do transdutor montado em laboratório.

A camada de retaguarda é um material composto de epóxi e tungstênio com uma fração volumétrica de 25,7% com 10,0mm de espessura. Para a camada de

casamento é utilizado resina epóxi com espessura de um quarto de comprimento de onda ($\lambda/4$). Finalmente o encapsulamento formado por duas partes, a primeira de nylon que atua como isolante e a segunda de aço que serve para proteção e blindagem eletromagnética, ambas de 1,0 mm de espessura.

Nas fig.3.12 e 3.13 apresentam-se as fotos do transdutor desenvolvido no laboratório e a comparação do mesmo com um transdutor comercial de 2,25 MHz de metaniobato de chumbo.

Figura 3.12. Transdutor de PZT5A de freqüência central 2 MHz montado em laboratório.

Figura 3.13. Transdutores de 2,25 MHz comercial e de 2 MHz montado em laboratório.

3.4. Propagação da Onda Acústica

Os fundamentos teóricos sobre propagação da onda acústica em sólidos e líquidos encontram-se bem detalhados na literatura (BABOUX et al, 1992a) (WEIGHT, 1984) (WEIGHT, 1987), e são apresentados de forma resumida neste trabalho.

A presença de um campo acústico, num meio elástico, é caracterizada pelas variações das propriedades físicas que descrevem o estado do meio. A amplitude, modo de vibração e velocidade das ondas diferem em sólidos, líquidos e gases, pela grande diferença na distância entre as partículas e o comportamento elástico do material.

No interior de um meio elástico genérico, temos basicamente dois tipos de deformações possíveis que podem criar tensão de compressão ou tensão de cisalhamento. Conseqüentemente tem dois modos de propagação possíveis, fig.3.14: ondas de tração e compressão conhecidas como ondas longitudinais, e ondas de cisalhamento ou ondas transversais. As ondas de cisalhamento existem apenas em meios que suportam cisalhamento, como nos sólidos em geral. As ondas acústicas geradas em fluidos não viscosos são ondas longitudinais. Nos fluidos, as forças responsáveis pela propagação são unicamente provenientes das variações de pressão quando o fluido é comprimido ou expandido.

As ondas longitudinais chamadas ondas de compressão, são as mais usadas na inspeção de materiais. Estas ondas viajam através dos materiais como uma série de compressões e expansões alternadas nas quais as partículas transmitem a vibração da onda para trás e para frente na direção de propagação da onda. Essas ondas existem em líquidos e em sólidos. As ondas transversais conhecidas como ondas de cisalhamento, são usadas também na inspeção de materiais. Estas ondas podem ser visualizadas como a vibração de uma corda que se move ritmicamente, na qual cada partícula vibra para acima e para baixo num plano perpendicular à direção de propagação. Essas ondas requerem um meio sólido para se propagar. As ondas de cisalhamento são relativamente mais fracas que as ondas longitudinais em relação à amplitude. De fato as ondas de cisalhamento são geradas usando parte da energia das ondas longitudinais.

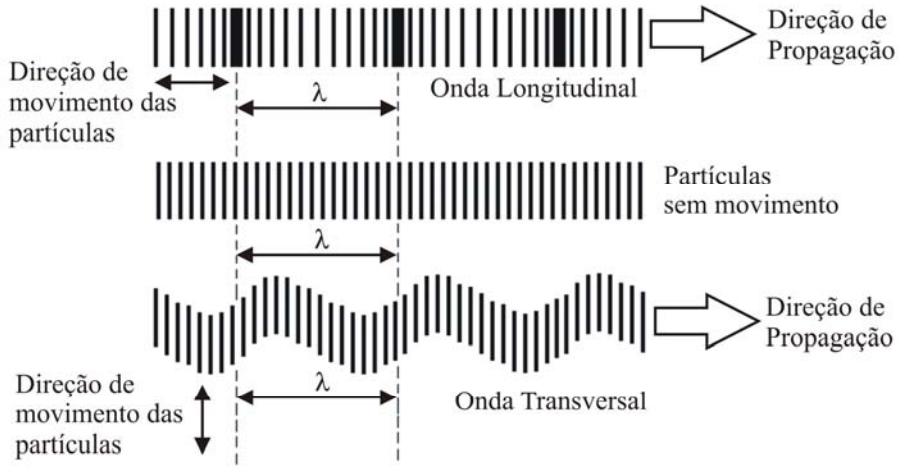


Figura 3.14. Formas de propagação de ondas de ultra-som.

3.4.1 Modelos de Propagação em Líquidos

Os modelos de propagação de ondas em líquidos desenvolvidos por Weight (WEIGHT, 1984) consideram a geração e recepção de ondas de ultra-som por transdutores que funcionam de acordo com o modelo ideal de um pistão plano (STEPANISHEN, 1971). Nesses modelos observam-se dois tipos de ondas. A primeira é uma frente de onda plana que se propaga para frente da fase do pistão num cilindro imaginário que tem por base o pistão. A segunda, e uma onda de borda originada pelo movimento relativo entre o pistão e a região que o circunda. Essa onda se propaga na região frontal a partir da borda do pistão gerando uma onda de forma toroidal, fig.3.15.

A pressão da onda plana é proporcional à velocidade da face do pistão. A região da onda de borda que se encontra dentro do cilindro imaginário possui fase inversa à fase da onda plana que se propaga dentro do cilindro. Enquanto a região da onda de borda que se propaga fora do cilindro imaginário na frente do pistão, tem a mesma fase que a onda plana.

Assim, a forma da onda de pressão resultante para um ponto no campo acústico gerado na propagação em líquidos é explicada com a onda plana e a onda de borda. Se o ponto encontra-se no eixo simétrico perto do transdutor aparecem as ondas plana e de borda separadas no tempo. Para um ponto fora do eixo, mas dentro do cilindro imaginário, a onda de pressão apresenta três componentes. A primeira é a

onda plana e as duas seguintes são as ondas de borda correspondentes à borda mais próxima e à borda mais distante, respectivamente. Finalmente, fora do cilindro imaginário não existe onda plana. O campo acústico nessa região está formado por duas ondas de borda. Sendo a polaridade do pulso gerado pela borda mais próxima, invertido em relação ao pulso gerado pela borda mais distante (WEIGHT, 1984).

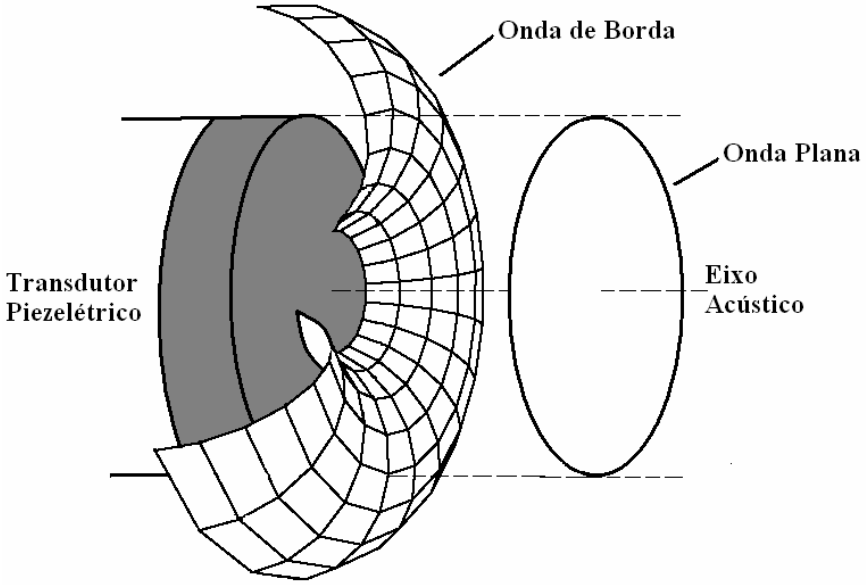
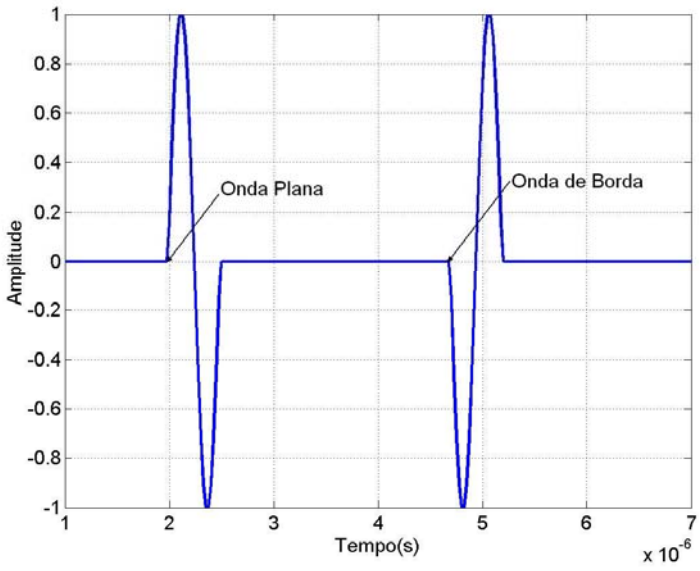
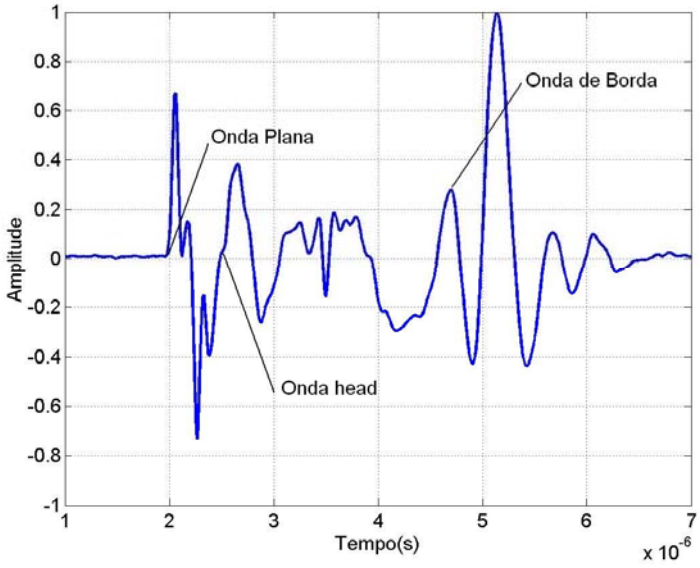


Figura 3.15. Esquema das ondas plana e de borda de um pistão plano.

As verificações experimentais de propagação em água (WEIGHT, 1984) mostram que existem outros efeitos não previstos nos modelos baseados no pistão plano. Os efeitos mais importantes estão relacionados à propagação de ondas radiais de compressão e superficial no disco de cerâmica piezelétrica do transdutor. Essas ondas radiais superficiais de compressão geram uma onda cônica que se propaga inicialmente à frente das ondas de borda provocando interferências nessa onda e alguns autores chamam de "*head waves*" (HAYMAN et al, 1979), fig.3.16. As características dessas ondas estão relacionadas às propriedades do material piezelétrico e da camada de retaguarda do transdutor, também dependem da espessura dessa camada e do encapsulamento.



a)



b)

Figura 3.16. Forma de onda de pressão gerada em água por um transdutor de 2MHz num ponto no eixo e a 3mm da face do transdutor a) modelo do pistão plano b) verificações experimentais.

3.4.2 Modelos de Propagação em Sólidos

A propagação da onda acústica em sólidos é mais complicada que a propagação em líquidos e as verificações experimentais são mais difíceis de serem

realizadas devido à existência de ondas de cisalhamento. As ondas de borda e as ondas *head* dão origem a ondas de cisalhamento devido à conversão de modos na interface entre o transdutor e o sólido. As ondas de cisalhamento dependem do ângulo de incidência no sólido (BABOUX et al, 1992a) (BABOUX et al, 1992b).

Assim, quando um transdutor é acoplado a um meio sólido e é excitado eletricamente, prevêem-se quatro tipos principais de ondas de ultra-som, como mostrado na fig.3.17: A onda plana que se propaga para frente no cilindro imaginário, as ondas de borda que se propagam em toda a região frontal a partir das bordas do transdutor (onda de borda plana e a onda de borda de cisalhamento), e finalmente as ondas *head* (BABOUX et al, 1992a).

As ondas de cisalhamento da borda são originadas pelo modo de conversão das ondas planas da borda. Na direção exatamente na frente da borda do transdutor não ocorre conversão de modos, porque a onda de compressão da borda tem incidência normal.

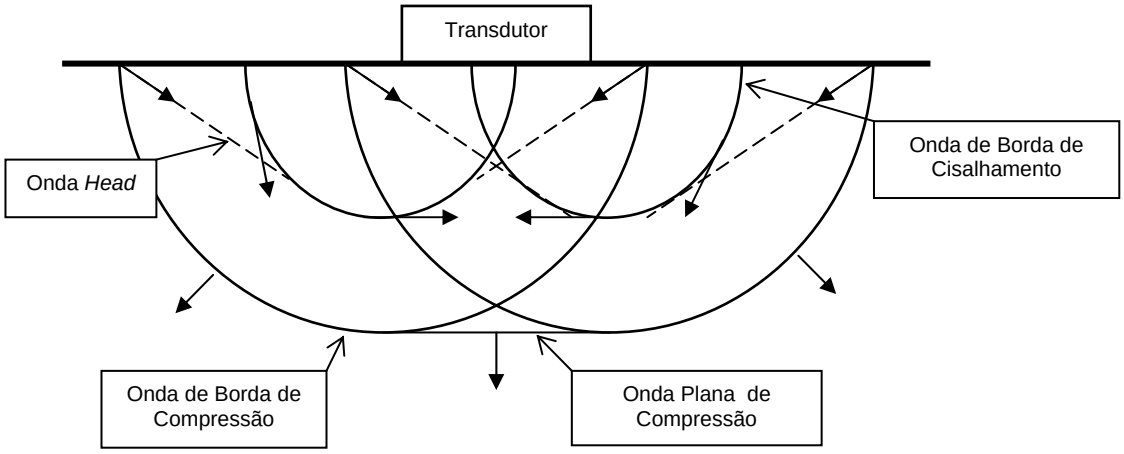


Figura 3.17. Frentes de onda irradiadas num meio sólido por um transdutor piezelétrico (BABOUX et al, 1992a).

Por outro lado, dentro do cilindro imaginário e da borda do transdutor, as ondas plana de compressão e de compressão da borda se sobrepõem, o que gera uma onda de cisalhamento na direção normal à superfície do transdutor. Dentro da região geométrica na frente do transdutor, o sentido do deslocamento da onda de compressão da borda é invertido comparado com o sentido do deslocamento da onda

plana, mas tem o mesmo sentido fora da região geométrica. Essa relação de fases é similar à propagação em fluidos. Considerando o deslocamento da onda de cisalhamento da borda, esta apresenta uma polaridade uniforme ao redor da borda do transdutor (WEIGHT, 1987).

Ilan (ILAN et al, 1990) desenvolveu um modelo para propagação de ondas de ultra-som em sólidos utilizando o método das diferenças finitas simulando um pistão plano radiando em um bloco de aço. Utilizando um programa implementado em MATLAB (ANEXO12) para esse modelo, consegue-se plotar a forma de onda num ponto para a componente de velocidade na direção de propagação. Assim, na fig.3.18 apresenta-se a onda de velocidade para um ponto situado no eixo e a uma distância de 8mm da face do transdutor, simulando um pistão plano de 12,7mm de diâmetro e freqüência central de 1MHz radiando num bloco de aço.

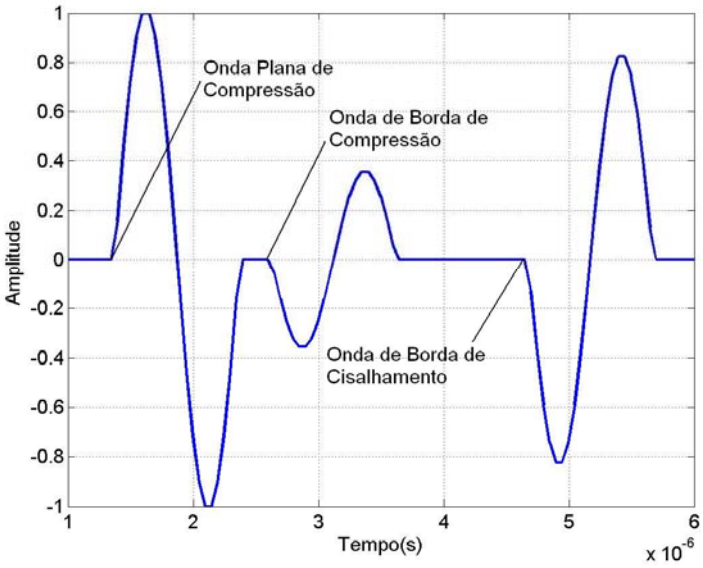


Figura 3.18. Onda de velocidade gerada por um pistão plano de 12,7mm de diâmetro e freqüência 1MHz em aço a uma distância de 8mm da face do pistão e no eixo.

Na forma de onda gerada distinguem-se três pulsos bem definidos, o primeiro corresponde à onda plana, o segundo à onda de compressão da borda e o terceiro à onda de cisalhamento da borda. Como o modelo é ideal não se observa a existência de ondas *head* na forma de onda plotada.

Para o entendimento físico da geração e natureza das ondas de borda observa-se a fig.3.19 (ILAN et al, 1990). Nessa figura a linha pontilhada representa a superfície não deslocada e a linha tracejada representa o deslocamento da borda de um transdutor acoplado a um meio líquido hipotético o qual não apresenta tensões tangenciais. A linha contínua representa o deslocamento de um material sólido elástico. Assim, na região frontal da face do transdutor geram-se forças elásticas perpendiculares à face do transdutor. Na região próxima, dentro da linha de borda do transdutor geram-se forças elásticas adicionais para manter a continuidade do material. Na linha de borda do transdutor, essas forças adicionais são dirigidas em direção a um ponto da posição original da linha de borda para puxar para trás a superfície da interface. De maneira oposta, na região próxima, fora da linha de borda do transdutor as forças adicionais são dirigidas para fora da borda do transdutor com o objetivo de empurrar a superfície da interface. As componentes radiais das forças adicionais dão origem a ondas de borda de compressão que possuem polaridade inversa à onda plana na região do cilindro imaginário na frente do transdutor, e a mesma polaridade da onda plana fora desta região. As componentes tangenciais das forças adicionais criam ondas de borda de cisalhamento com fase constante.

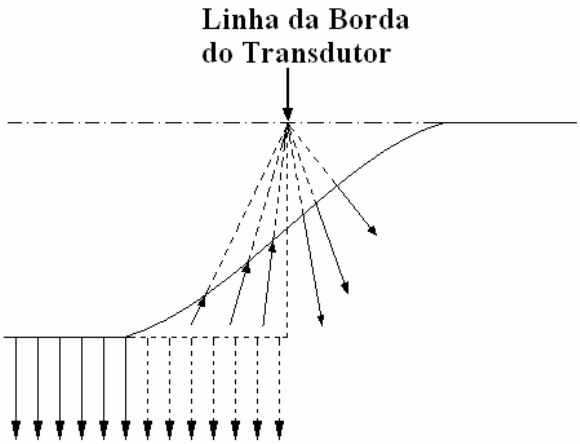


Figura 3.19. Representação esquemática da origem das ondas de borda (ILAN et al, 1990).

As ondas *head* em sólidos possuem maior velocidade de propagação que as ondas de borda de cisalhamento e menor velocidade que as ondas de compressão

plana e de compressão da borda (BABOUX et al, 1992a). A onda *head* corresponde ao modo de conversão da onda plana de compressão da borda. Pela forma cônica da onda *head* e por simetria essa onda tem valor de amplitude máxima no eixo acústico, onde a onda existe. Assim utilizando o modelo geométrico de (BABOUX et al, 1992a) baseado em leis de refração mostra-se que nem todos os pontos do espaço na frente do transdutor são atingidos pela onda *head*, fig.3.20.

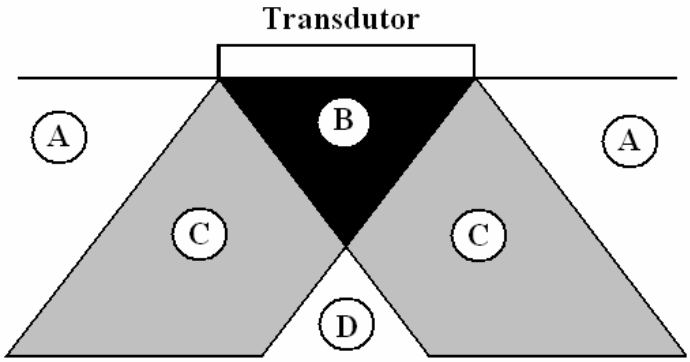


Figura 3.20. Geometria para a definição das regiões atingidas pelas ondas head (BABOUX et al, 1992a).

Assim, o espaço onde se propaga a onda deve separar-se em quatro regiões: regiões A e B onde cada ponto é atingido pelas ondas *head* provenientes das bordas diametralmente opostas. Região C onde somente uma borda contribui com a *head*. Finalmente a região D onde não existem as ondas *head*.

As ondas *head* possuem amplitude menor que as outras ondas que se propagam no sólido. Para sólidos muito finos em espessura as múltiplas reflexões dentro do sólido criam sinais que complicam a interpretação das ondas *head* (BABOUX et al, 1992a).

3.4.3 Modelo dos Ecos produzidos por pequenos refletores em meios líquidos

As formas de onda dos sinais de eco para pequenos refletores apresentam uma estrutura com vários pulsos que variam com o tamanho do refletor e com sua posição no campo produzido pelo transdutor. A reflexão das ondas plana e de borda dão origem a essa estrutura mais complexa, como mostrado na fig.3.21.

Em (MCLAREN et al, 1987) explica-se de maneira detalhada o comportamento dos ecos produzidos por um pequeno refletor num meio líquido. Naquele trabalho considera-se um refletor de diâmetro igual a um comprimento de onda do pulso emitido, posicionado no eixo e fora do eixo do transdutor. As reflexões geradas pelas ondas plana e de borda no refletor são iguais em amplitude e originam dois ecos, fig.3.21(a).

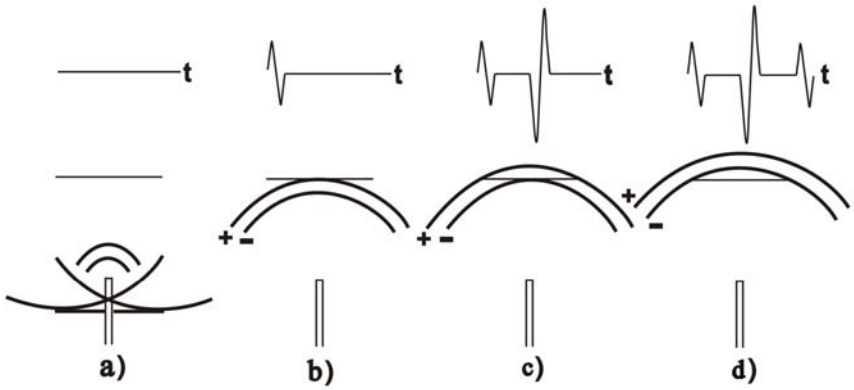
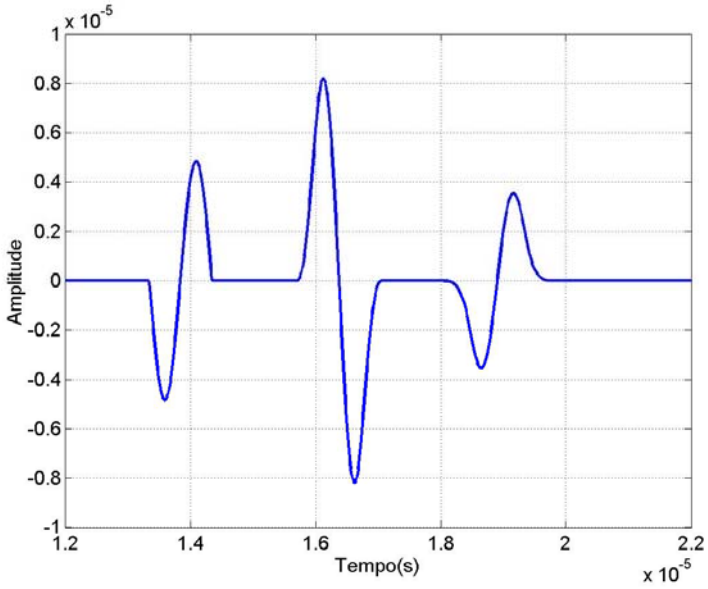


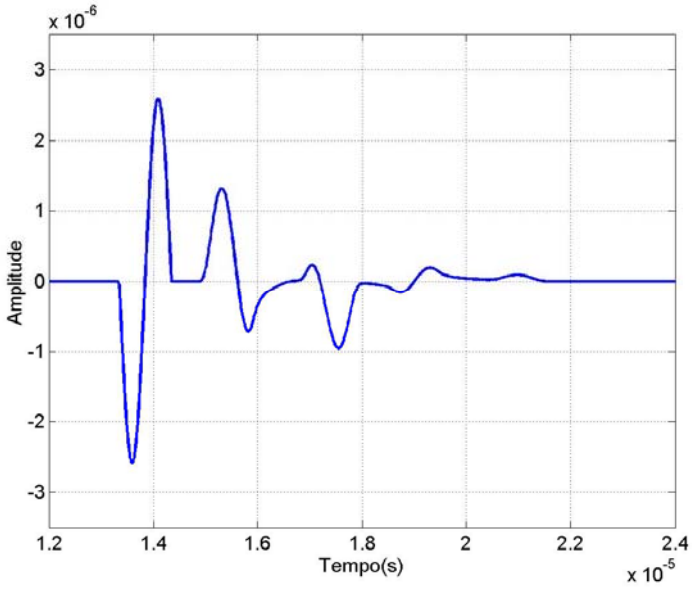
Figura 3.21. Ecos gerados por um refletor de tamanho 1λ em água no eixo do transdutor (WEIGHT et al, 1978).

O resultado consiste numa estrutura de três pulsos, sendo o primeiro gerado pelo eco da onda plana refletida e atingindo o centro da face do transdutor, o segundo gerado pela soma do eco da onda plana refletida atingindo as bordas do transdutor com o eco da onda de borda refletida atingindo o centro da face do transdutor, e o terceiro gerado pelo eco da onda de borda refletida atingindo as bordas do transdutor, fig.3.21(b), (c) e (d), fig.3.22(a).

Considerando o mesmo refletor fora do eixo do transdutor existem mais duas contribuições a se considerar. Uma devido à borda mais próxima e outra devido à borda mais distante do transdutor. Assim, a onda plana continua sendo a mesma, mas o segundo e terceiro pulso estão divididos, gerando assim uma resposta mais complexa que consiste em vários pulsos de pequena amplitude (MCLAREN et al, 1987), fig.3.22(b).



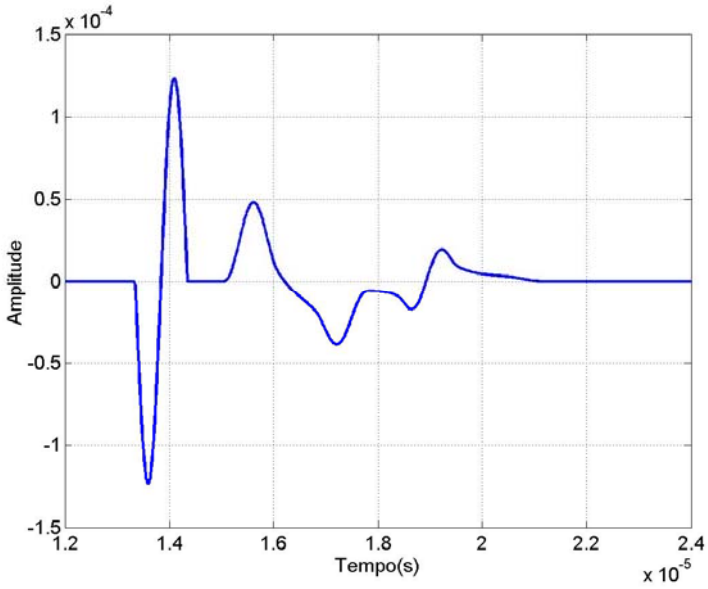
a)



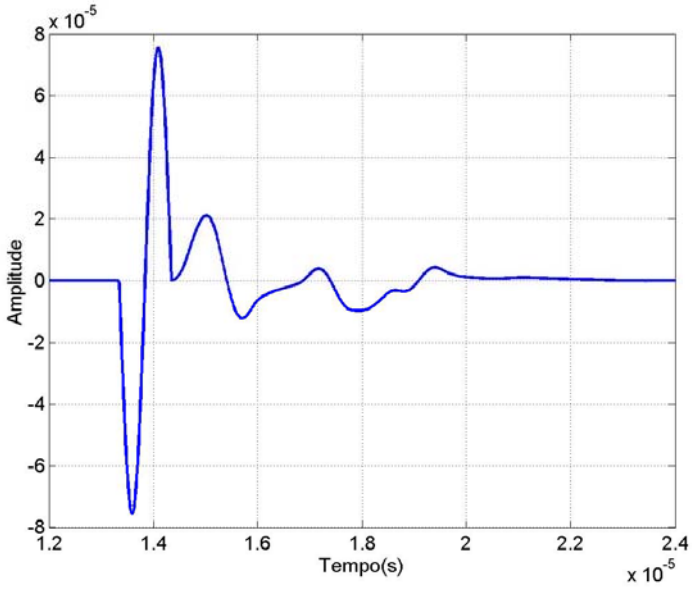
b)

Figura 3.22. Ecos gerados por um refletor de diâmetro 0,8mm em água a 10mm de distância do transdutor de 1MHz e 19mm de diâmetro, a) no eixo e b) 2mm fora do eixo.

Para refletores de maior tamanho também é possível identificar uma estrutura de três pulsos quando o refletor está no eixo do transdutor. Permanece a onda plana com amplitude maior devido ao aumento da área do refletor, o segundo e o terceiro pulso são menores e se espalham no tempo, fig.3.23(a)



a)

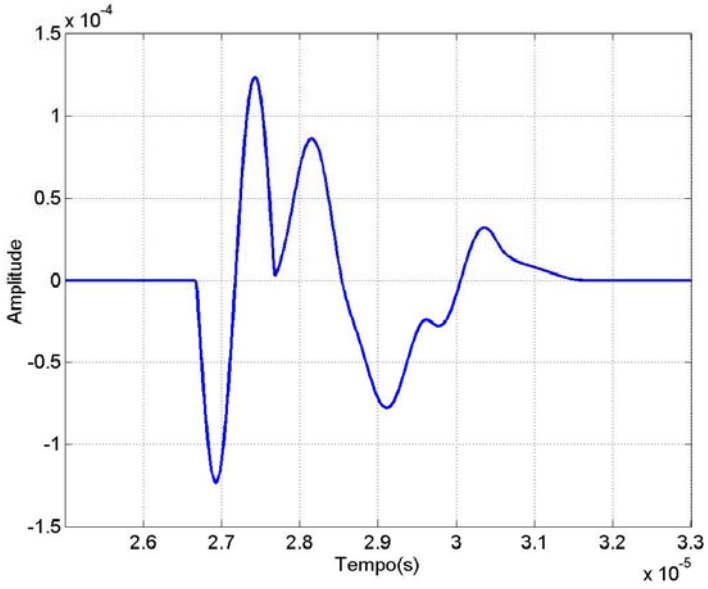


b)

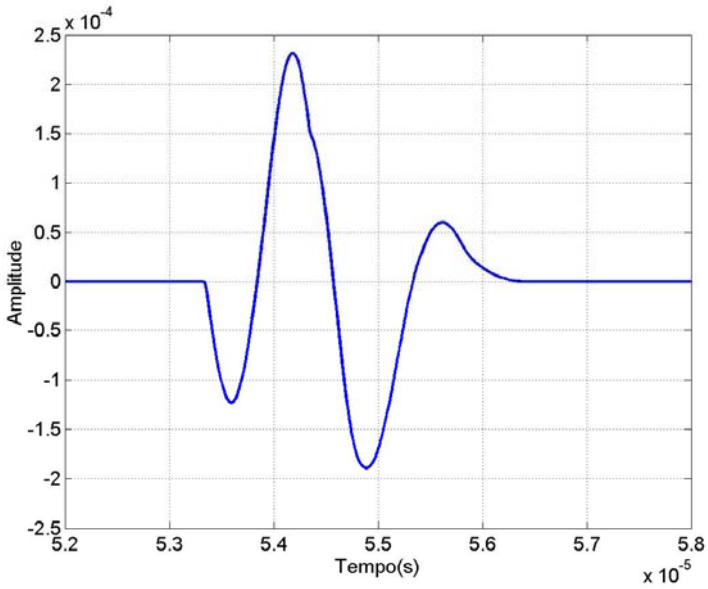
Figura 3.23. Ecos gerados por um refletor de diâmetro 4mm em água a 10mm de distância do transdutor de 1MHz e 19mm de diâmetro, a) no eixo e b) 2mm fora do eixo.

Fora do eixo, os pulsos são mais complexos e são formados pela onda plana e varias componentes de pequena amplitude das ondas de borda, fig.3.23(b). Apresenta-se assim uma relação inversa entre o tamanho do refletor e as amplitudes das ondas de borda. Os pulsos dos ecos também variam com a distância entre o

refletor e o transdutor. Para distâncias maiores, o tempo de separação entre os ecos da onda plana e de borda fica cada vez mais curto até que se sobrepõem formando somente um pulso, fig.3.24(a) e (b).



a)



b)

Figura 3.24. Ecos gerados por um refletor de diâmetro 4mm em água para o transdutor de 1MHz e 19mm de diâmetro, no eixo e a) a 20mm de distância do transdutor e b) a 40mm de distância do transdutor.

3.4.4 Modelo dos Ecos produzidos por pequenos refletores em meios sólidos

Os transdutores piezelétricos de ultra-som radiando num meio sólido geram ondas planas longitudinais, ondas longitudinais da borda e as ondas de cisalhamento da borda. Como resultado da conversão de modos, a reflexão produzida pelos refletores em sólidos inclui geralmente componentes de ondas de compressão e de cisalhamento. Em meios sólidos, especialmente para o caso de pequenos refletores ou defeitos no campo próximo de tamanho 1λ, a existência de ondas de cisalhamento e de compressão e os modos de conversão no defeito geram uma resposta ainda mais complexa (WEIGHT, 1993).

Para distâncias relativamente pequenas, as componentes de onda plana e de borda estão separadas no tempo, e de forma geral a resposta do eco consiste em seis pulsos, fig.3.26. O transdutor gera uma onda plana de compressão Pc, uma onda de borda de compressão Ec e uma onda de borda de cisalhamento Es que atingem o refletor como mostrado na fig.3.25. As reflexões produzidas pelas ondas de compressão plana e de borda geram duas ondas em cada reflexão, uma onda de compressão e uma de cisalhamento: $P'cc$, $P'cs$ e $E'cc$, $E'cs$ e $E'sc$, $E'ss$ respectivamente, fig.3.27 e fig.3.28.

As ondas de cisalhamento geradas pelo transdutor e pela reflexão têm velocidades bem menores que as ondas de compressão. Quando uma onda esférica de pressão local gerada por um ponto de reflexão no eixo de um transdutor circular é recebida, são gerados dois pulsos iguais, mas de polaridade inversa (WEIGHT et al, 1978): O primeiro pulso quando a frente de onda alcança a face do transdutor e o outro quando passa através de suas bordas. Por isso, para a visualização dos ecos gerados é importante denotar corretamente o tipo de onda que atinge o defeito, e o tipo de onda gerado pela reflexão do defeito e se é recebido no centro ou na borda do transdutor. Assim, na denotação dos ecos se utilizam duas letras com subscrito cada uma. A primeira letra representa o tipo de onda que atinge o refletor, sendo p para onda plana e e para onda de borda. O subscrito indica se é uma onda de compressão c ou se é uma onda de cisalhamento s. A segunda letra denota a forma como a onda gerada pela reflexão é recebida no transdutor. Assim, p quando é recebida no centro

do transdutor ou e quando é recebida na borda. O subscrito indica se a onda refletida é de compressão c ou de cisalhamento s.

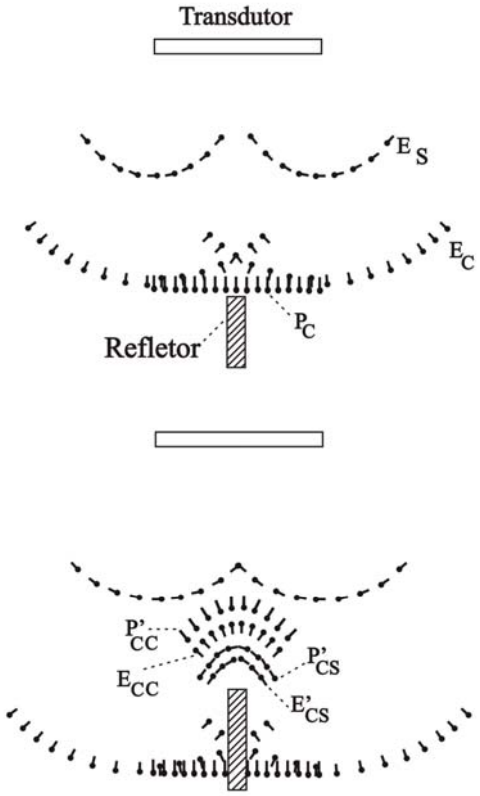


Figura 3.25. Ondas irradiadas por um transdutor circular num sólido e ondas geradas pela reflexão produzida por um pequeno refletor (WEIGHT, 1993).

As ondas refletidas têm uma frente de onda hemisférica. Os primeiros ecos que voltam para o transdutor, fig.3.27 estão separados em três tempos sucessivos. O primeiro eco que atinge o centro da face do transdutor é a componente de compressão gerada pela reflexão da onda plana de compressão $p_c p_c$, apresenta uma polaridade negativa. O segundo eco $\overline{p_c e_c}$ é a componente de compressão gerada pela soma de duas reflexões, a primeira é a reflexão da onda de compressão plana quando corta as bordas do transdutor, e a segunda é a reflexão da onda de compressão da borda atinge o centro da superfície do transdutor produzindo um pulso de polaridade negativa ao primeiro pulso. Assim, pelo fato que esse segundo

pulso foi gerado por duas ondas diferentes, coloca-se uma linha acima das letras na denotação. O terceiro eco representa a componente de compressão gerada pela reflexão da onda de compressão da borda quando atravessa as bordas do transdutor $e_c e_c$, fig.3.27. A onda de cisalhamento gerada pela reflexão da onda de compressão plana não produz pulso nenhum quando atinge o centro do transdutor, pois a componente normal da onda de cisalhamento é zero no eixo do transdutor.

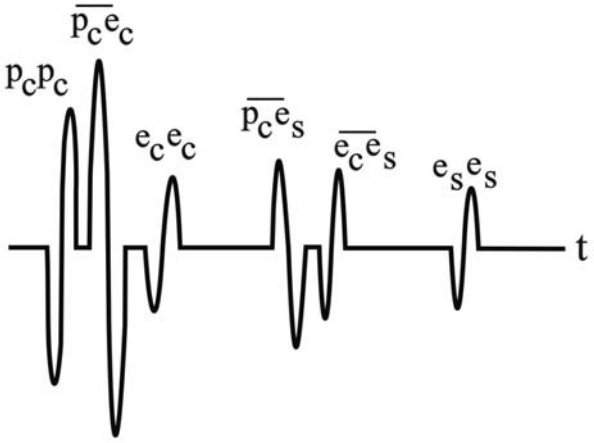


Figura 3.26. Eco gerado por um refletor num meio sólido no eixo do transdutor (WEIGHT, 1993).

O quarto eco $\overline{p_c e_s}$ representa a soma de três ondas. Primeiro a onda de cisalhamento que atinge as bordas do transdutor, gerada pela reflexão da onda de compressão plana no refletor. A segunda onda de compressão que atinge o centro do transdutor, gerada pela reflexão da onda de cisalhamento da borda. E a terceira onda de cisalhamento gerada pela reflexão da onda de compressão da borda atingindo o centro do transdutor, mas como essa onda não tem componente normal não produz nenhum pulso. Assim, pode-se dizer que o quarto eco da figura 3.28 é formado pela sobreposição de duas ondas de polaridade positiva.

O quinto eco $\overline{e_c e_s}$ da figura 3.28 é um pulso negativo gerado por duas ondas. A primeira que é a onda de cisalhamento gerada pela reflexão da onda de compressão da borda atingindo as bordas do transdutor. E a segunda é a onda de compressão gerada pela reflexão da onda de cisalhamento da borda atingindo as

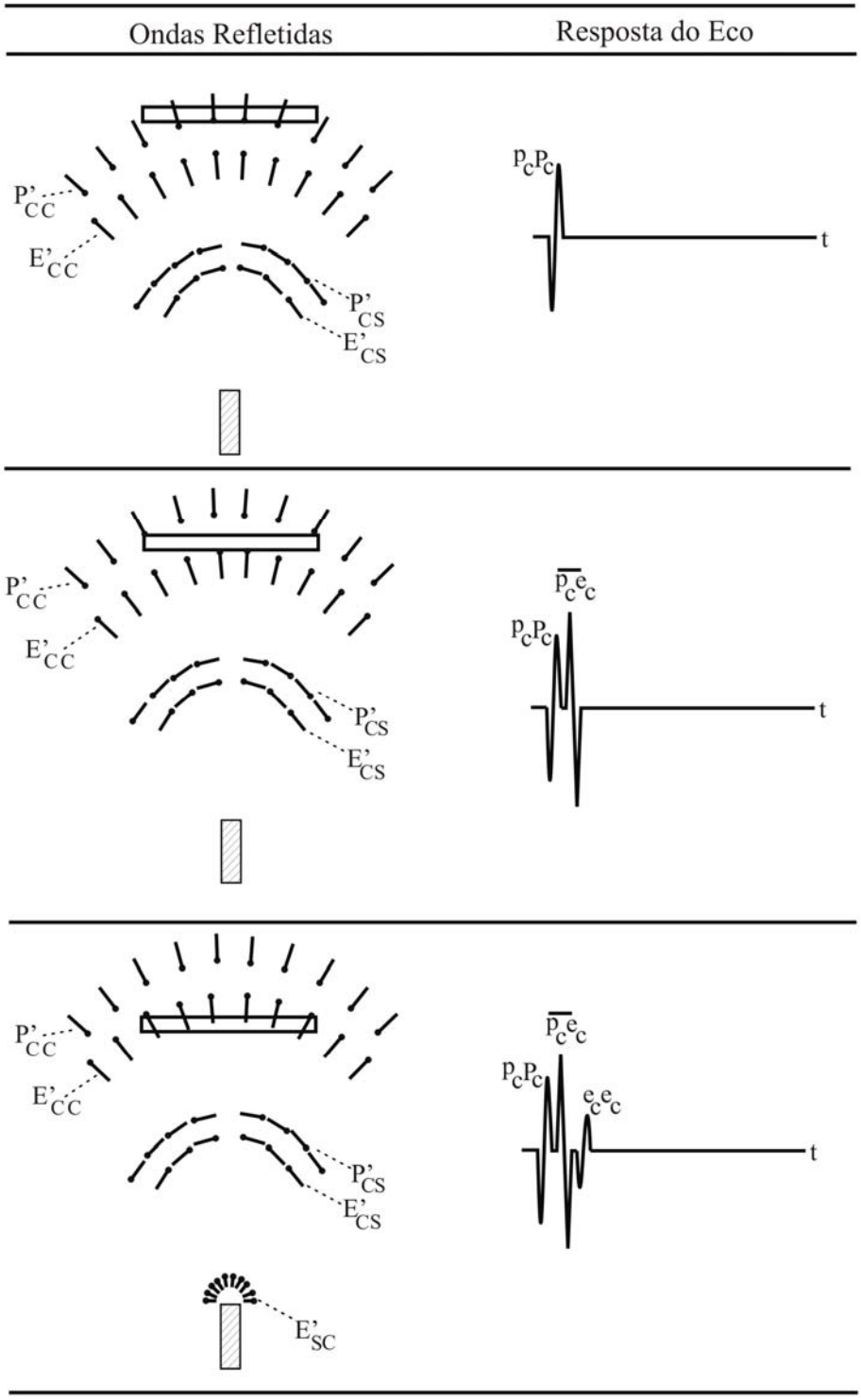


Figura 3.27. Primeiros três ecos produzido pelas ondas refletidas por um refletor num meio sólido (WEIGHT, 1993).

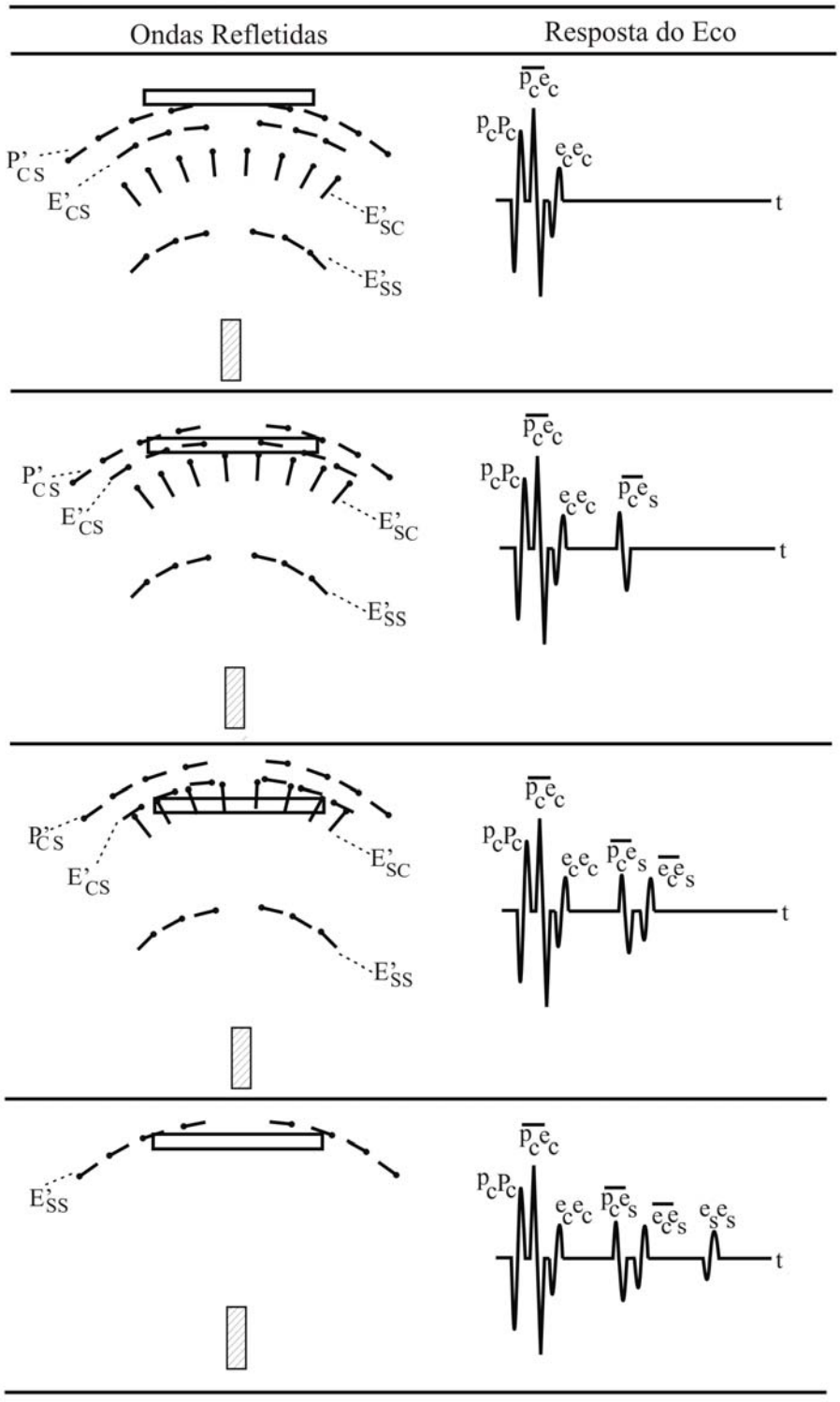


Figura 3.28. Últimos quatro ecos produzido pelas ondas refletidas por um refletor num meio sólido (WEIGHT, 1993).

bordas do transdutor. Finalmente o sexto pulso e último $e_s e_s$, representa a componente de cisalhamento gerada pela reflexão da onda de cisalhamento da borda que atinge as bordas do transdutor, fig.3.28. Na tabela 3.3 apresenta-se um resumo dos ecos gerados por um pequeno defeito num meio sólido.

Tabela 3.3. Denotação dos ecos gerados por um refletor num meio sólido no eixo do transdutor.

Eco		**Onda Incidente**	**Recebido**	**Onda de espalhamento**
$p_c p_c$		Plana de Compressão	No eixo	Compressão
$\overline{p_c e_c}$	$p_c e_c$	Plana de Compressão	Na borda	Compressão
	$e_c p_c$	Compressão da Borda	No eixo	Compressão
$e_c e_c$		Compressão da Borda	Na borda	Compressão
$\overline{p_c e_s}$	$p_c e_s$	Plana de Compressão	Na borda	Cisalhamento
	$e_s p_c$	Cisalhamento da Borda	No eixo	Compressão
$\overline{e_c e_s}$	$e_c e_s$	Compressão da Borda	Na borda	Cisalhamento
	$e_s e_c$	Cisalhamento da Borda	Na borda	Compressão
$e_s e_s$		Cisalhamento da Borda	Na Borda	Cisalhamento

4. MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS

4.1 Modelagem de Líquidos e Líquidos com interface fluido/estrutura

Para a modelagem em ANSYS de meios líquidos axi-simétricos, utiliza-se o elemento FLUID29. É um tipo de elemento 2-D denominado fluido acústico. É usado na modelagem de meios fluidos e em problemas que têm interação fluido estrutura. Pode se utilizar em aplicações onde há propagação de ondas. A equação da onda em 2-D é discretizada levando-se em conta a pressão acústica e o movimento estrutural na interface. O elemento tem quatro nós nos vértices com três graus de liberdade por nó: translação nas direções nodais X e Y, e pressão. A translação é aplicada somente nos nós que se encontram na interface. O elemento tem a capacidade de definir um valor para a impedância acústica assim pode-se controlar a reflexão e transmição da onda acústica na interface, consiguindo definir essa condição de contorno. Na modelagem de líquidos interfaceando com sólidos, é preciso mudar as condições de contorno do elemento FLUID29 na interface do meio líquido com o meio externo utilizando o elemento FLUID29 com estrutura.

Nos modelos desenvolvidos neste trabalho utiliza-se esse tipo de elemento para modelar o meio líquido, usando elementos sem estrutura para todo o meio em geral e elementos com estrutura para todas as bordas do meio exceto a borda do eixo de simetria. As propriedades do material e do elemento estão definidas no ANEXO1.

4.2 Modelagem de Sólidos Isotrópicos

Na modelagem dos sólidos, foi utilizado o elemento PLANE42, que é um elemento sólido quadrangular usado para modelagem 2-D de sólidos. O elemento pode ser usado como um elemento plano (tensão plana e deformação plana) ou como um elemento axi-simétrico; esse tipo de elemento é definido por quatro nós e tem dois graus de liberdade para cada nó: translação em X e Y. Neste trabalho utilizou-se esse tipo de elemento para modelar a camada de retaguarda (compósito de epóxi e Tungstênio), a camada de casamento (resina epóxi), o encapsulamento formado por uma parte de nylon e outra de aço, e os refletores e peças sólidas utilizando como

materiais aço e alumínio. As propriedades dos materiais e do elemento estão definidas no ANEXO1.

4.3 Modelagem da Cerâmica Piezelétrica

Para implementar os modelos dos materiais piezelétricos, foi utilizado o elemento PLANE13. O PLANE13 é um elemento sólido 2-D que possui propriedades magnéticas, térmicas, piezelétricas e estruturais com acoplamento entre os campos. Esse elemento é definido por quatro nós com quatro graus de liberdade por nó e pode ser modelado como axi-simétrico. Esse elemento foi utilizado para a modelagem da cerâmica piezelétrica com propriedades do material PZT5A. As propriedades do material e do elemento estão definidas no ANEXO1.

4.4 Convenção de Cores e Símbolos

Nos modelos apresentados neste trabalho, foi adotada uma simbologia e uma combinação de cores para denotar as condições de contorno aplicadas aos meios de propagação e para diferenciar os tipos de materiais e elementos utilizados no modelo. Assim, mostra-se a seguir o significado de cada símbolo e cor:

- Símbolos:

= Condição de contorno de engaste no eixo X.

= Condição de contorno de engaste no eixo Y.

= Condição de contorno para deslocamento aplicado.

= Condição de contorno para pressão aplicada.

= Condição de contorno para acoplamento de nós na voltagem.

= Elemento Finito.

- Cores dos tipos de elementos e materiais:

= Elemento fluido, material água.

= Elemento fluido/estrutura, material água.

= Elemento sólido istotrópico, material aço.

= Elemento sólido isotrópico, material composto epoxy/tungstênio.

= Elemento sólido piezelétrico, material PZT5A.

= Elemento sólido isotrópico, material epoxy.

= Elemento sólido isotrópico, material nylon.

= Elemento sólido isotrópico, material alumínio.

O tamanho dos elementos utilizados nos modelos foi definido segundo a discretizalção no espaço definida na seção 5.2.

- Tamanho do elemento para os materiais:

  Água = $3{,}75 \times 10^{-5}$ m.

  Aço = $1{,}745 \times 10^{-4}$ m.

  Composto epoxy/tungstênio = $3{,}75 \times 10^{-5}$ m.

  PZT5A = $1{,}0875 \times 10^{-4}$ m.

  Epoxy = $5{,}6 \times 10^{-5}$ m.

  Nylon = $6{,}5 \times 10^{-5}$ m.

  Alumínio = $1{,}55 \times 10^{-5}$ m.

5. RESULTADOS

5.1 Arranjo Experimental

Os testes experimentais realizados para obter a forma de onda gerada pelo transdutor circular de 2MHz utilizando o hidrofone em tanque de imersão foram realizados com dois tipos de excitação. A primeira foi uma excitação de pulso curto com tempo de duração de 0,55μs. A segunda um pulso com forma de um ciclo de seno de freqüência 2MHz. O arranjo dos equipamentos utilizados é mostrado nas fig.5.1 e 5.2, para cada tipo de excitação respectivamente.

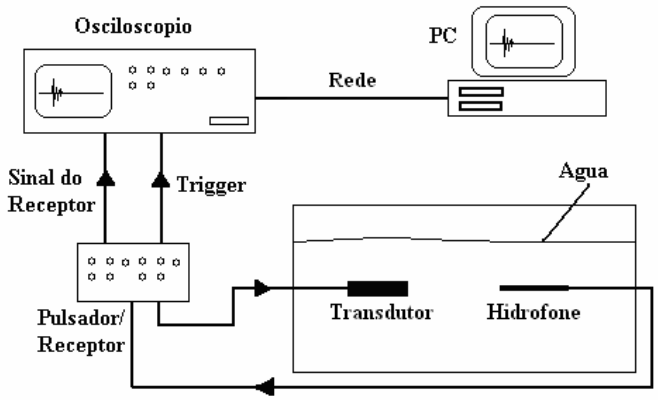


Figura 5.1. Esquema do arranjo experimental para medição da forma de onda do transdutor com excitação de pulso curto.

Na fig.5.1 o transdutor é excitado com pulsos curtos gerados pelo Pulsador/Receptor Panametrics modelo 5072PR com energia 104 μJ, um valor de amortecimento de 15 Ω e taxa de repetição de 100 Hz. O sinal foi recebido pelo hidrofone de diâmetro 0,3 mm e filtrado nas altas freqüências no Pulsador/Receptor. Esse sinal foi adquirido no osciloscópio Hewllet Packard modelo Infimun 500 MHz 2GSa/s. Para reduzir o nível de ruído foi utilizada uma média aritmética de 16 aquisições. Os sinais recebidos foram de 2505 pontos, com período de amostragem $4x10^{-9}$ s. O osciloscópio é conectado a um PC através de uma placa de rede. O software MATLAB é usado para o processamento digital dos dados.

A fig.5.2 apresenta o arranjo para os testes com excitação de um ciclo de seno. O sinal de excitação do transdutor foi criado no Gerador de Funções Tektronix TM5003 AFG 5012 na freqüência de 2MHz e amplitude 0,2V. Esse sinal foi amplificado no amplificador Amplifier Research Modelo 150A100A RF 150W, 10KHz-100MHz e enviado para o transdutor. A recepção do sinal e os parâmetros do Pulsador/Receptor e do Osciloscópio são os mesmos do caso anterior.

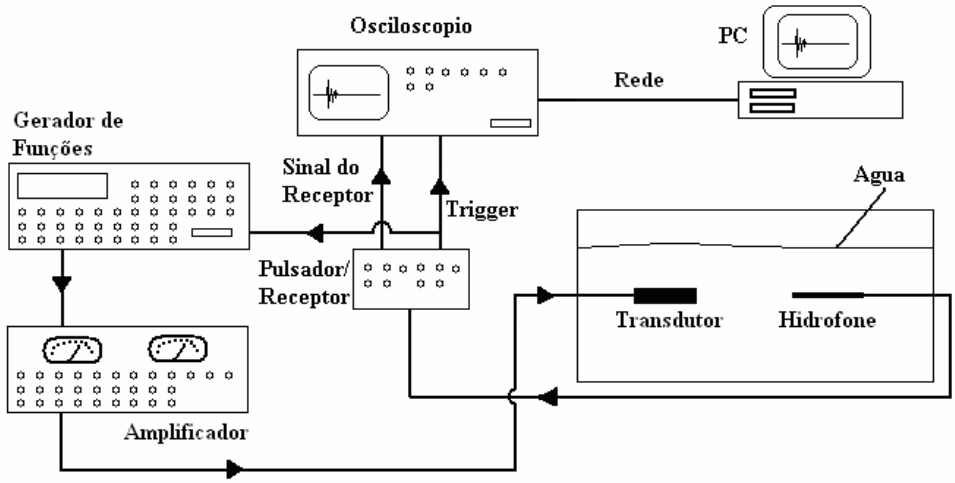


Figura 5.2. Esquema do arranjo experimental para medição da forma de onda do transdutor com excitação de um ciclo de seno.

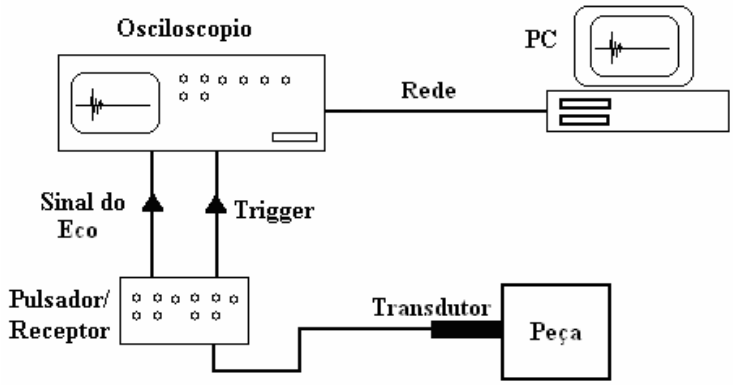


Figura 5.3. Esquema do arranjo experimental para medição dos ecos produzidos das peças com e sem defeito utilizando o transdutor excitado com pulso curto.

Nos testes experimentais realizados para a obtenção de ecos produzidos por peças de alumínio com e sem defeitos foi utilizado como sinal de excitação um pulso curto gerado pelo Pulsador/Receptor. Esses testes foram desenvolvidos utilizando a técnica pulso-eco. A fig.5.3 apresenta o arranjo experimental para estes testes. Os parâmetros utilizados no Pulsador/Receptor foram: energia 13μJ, um valor de amortecimento de 20Ω e taxa de repetição de 100Hz.

Nesses testes foram utilizadas três peças diferentes uma sem defeitos e as outras duas com furos cilíndricos localizados no eixo e com diâmetros de 1,5 e 5mm. Como mostrado nas figuras 5.4 (a), (b) e (c).

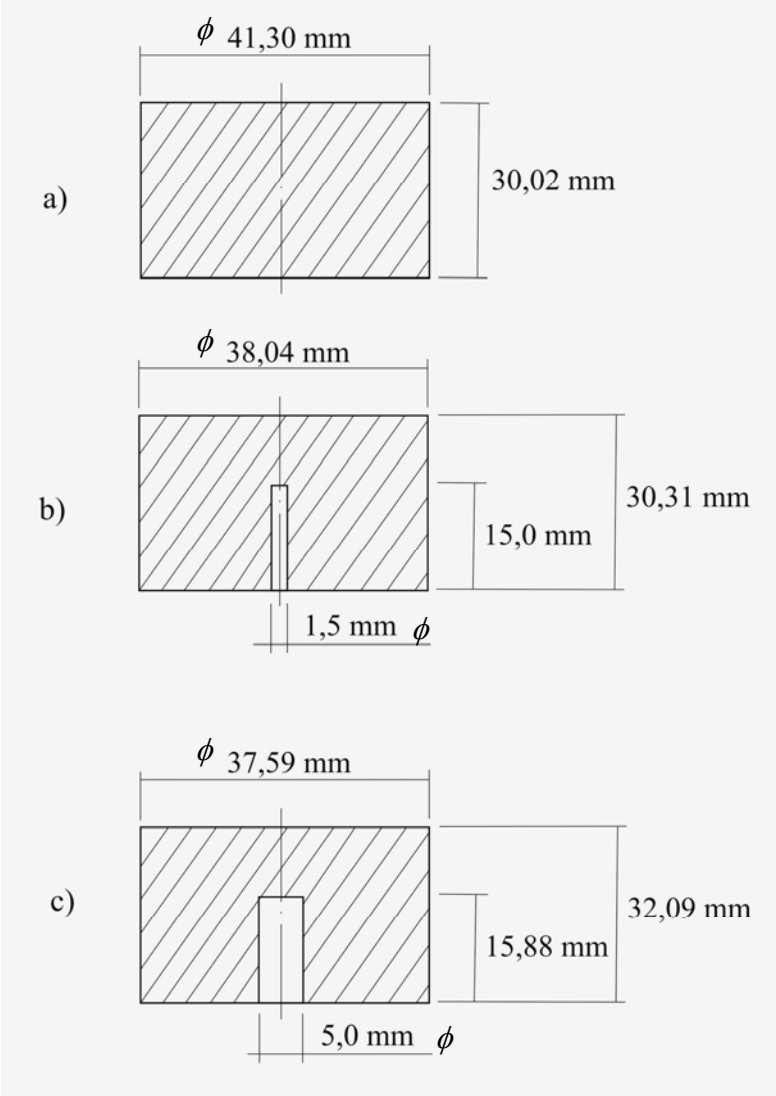


Figura 5.4. Esquema das peças utilizadas para fazer as medições de pulso-eco.

5.2 Convergência Numérica

Para a comprovação da convergência numérica do método, trabalhou-se com modelos de propagação de ondas de ultra-som produzidas por um pistão plano em água, fig.5.5. Os modelos axi-simétricos de meios líquidos possuem as dimensões de 20 mm por 20 mm. Foi aplicado um deslocamento, simulando a vibração de um pistão plano de raio 10 mm e freqüência central de 1 MHz. Para a comprovação da convergência numérica foram consideradas duas variáveis de discretização: espaço e tempo. O tipo de análise foi análise transiente. Nas figuras de esquemas dos modelos implementados neste trabalho o tamanho dos elementos está fora da escala real somente para o entendimento do modelo.

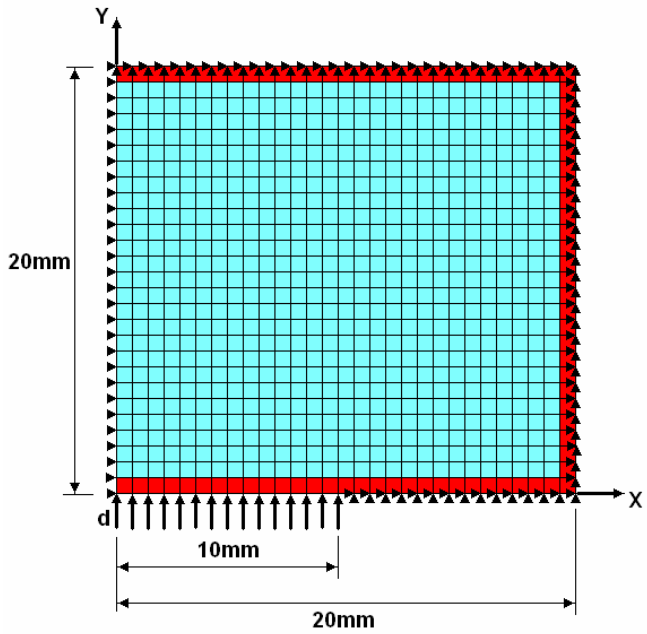


Figura 5.5. Esquema do modelo axi-simétrico para simulação do pistão plano radiando em água.

Para que os deslocamentos aplicados possam interagir com os elementos do fluido, foram utilizados elementos com interação fluido/estrutura. Esses elementos são colocados nas bordas do meio de propagação exceto no eixo Y de simetria. Aplica-se a condição de contorno de fluido/estrutura em todos os nós externos dos

elementos com interação fluido/estrutura. Para simular o pistão plano radiando no meio, aplicou-se uma função de deslocamento dado pela eq.(5.1). Os pontos dessa função foram obtidos por um código desenvolvido em MATLAB (ANEXO6), fig.5.6.

$$d = 10e^{-12} + 10e^{-12}\left(sen\left(2\pi \cdot f \cdot t - \pi/2\right)\right) \tag{5.1}$$

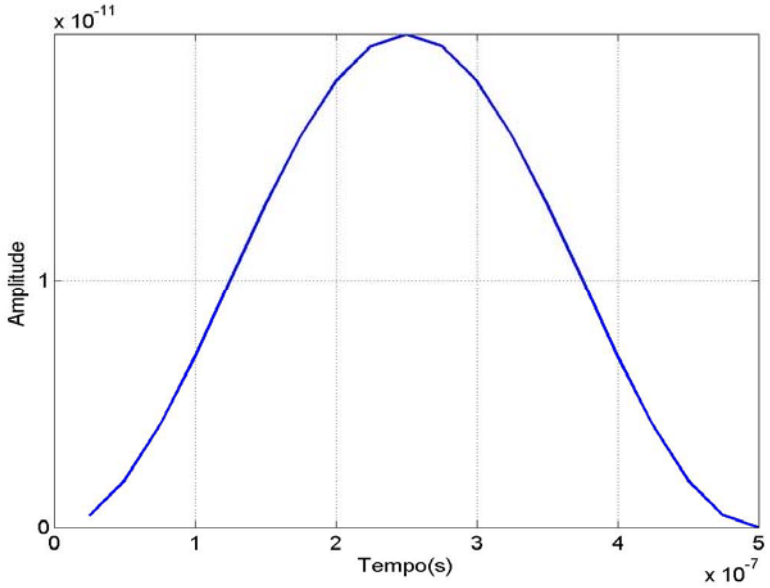


Figura 5.6. Função de deslocamento para simular o pistão plano em líquidos.

O meio simulado é considerado como um meio infinito com a finalidade de não apresentar reflexões, assim para a aplicação das condições de contorno restringe-se o deslocamento em X e Y para todas as bordas do meio, exceto onde se aplica o deslocamento e no eixo simétrico. Além disso, aplica-se uma impedância de valor 1 no contorno.

Para o caso da discretização no espaço, variou-se o número de elementos por comprimento de onda (λ=1,5mm para 1MHz). Foram feitos cinco testes. O primeiro teste foi feito com uma discretização de 10 elementos por comprimento de onda, o segundo com 15, o terceiro com 20, o quarto com 25 e o quinto com 30. A discretização no tempo foi mantida constante com incremento de 1/20 do período da onda. Para avaliar a convergência, os resultados da amplitude de onda obtidos das simulações pelo MEF foram comparados com os resultados obtidos pela simulação

com o moldelo da resposta impulsiva de um pistão plano (ANEXO7) que foi inplementado segundo o algoritmo apresentado por Weight (WEIGHT, 1984), obtendo-se assim o erro médio quadrático (EMQ) segundo a eq.(5.2). Onde x é o valor da amplitude na simulação pelo MEF, $\bar{x}$ o valor da amplitude obtida pela resposta impulsiva do pistão plano, para cada ponto respectivamente, e N é o numero de pontos.

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}_i\right)^2}{N*\left(N-1\right)}} \tag{5.2}$$

Na fig.5.7 é mostrada a curva de convergência para a discretização no espaço. A figura apresenta a tendência de convergência quando se aumenta o número de elementos. Para uma discretização de 20 até 30 elementos por comprimento de onda a variação no EMQ não é significativa. Adota-se então a discretização de 20 elementos por comprimento de onda para os modelos.

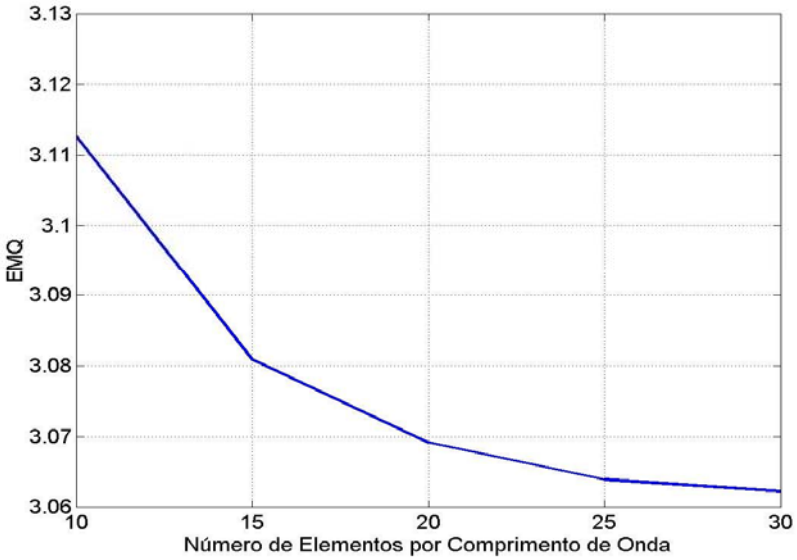


Figura 5.7. Convergência Numérica segundo a discretização no espaço.

Na verificação da convergência numérica no tempo foram feitos testes para Δt de 1/10, 1/15, 1/20, 1/25 e 1/30 do período da onda de 1MHz. Da mesma forma, os resultados obtidos foram comparados com o resultado obtido pelo modelo de

resposta impulsiva de um pistão plano, cujo código do programa de simulação encontra-se no (ANEXO7).

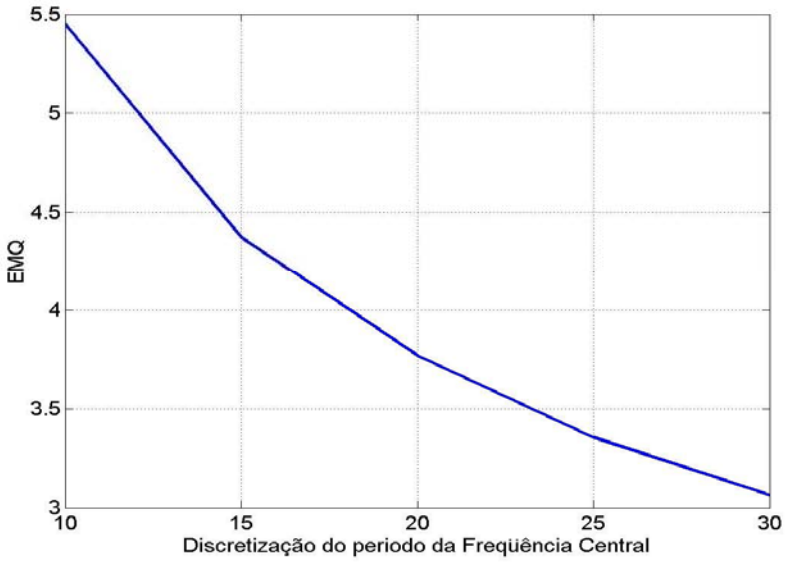


Figura 5.8. Convergência Numérica segundo a discretização no tempo.

De acordo com os resultados obtidos conclui-se que a discretização no tempo é mais crítica que no espaço. Considerando o tempo de processamento dos modelos adoutou-se uma discretização no tempo de Δt 1/20 do período da onda.

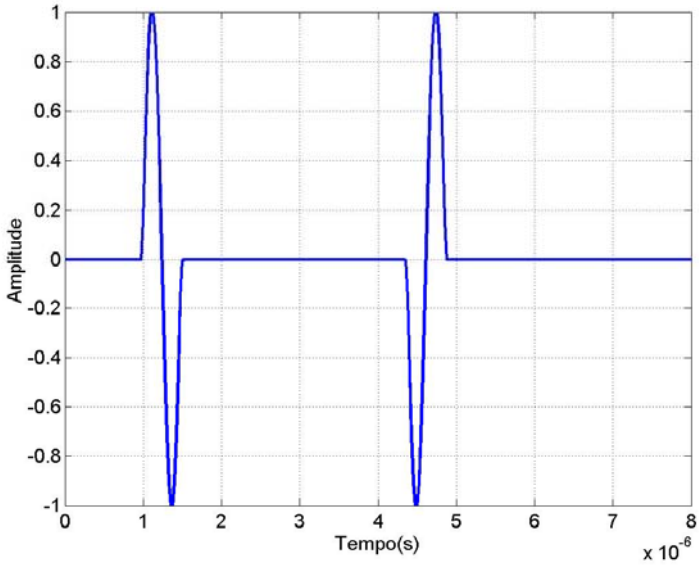
5.3 Simulação da Propagação em Líquidos

Estas simulações foram feitas considerando-se o mesmo modelo utilizado na seção 5.2, que encontra-se esquematizado na fig.5.5, somente com uma diferença nas medidas do meio. Foi modelado um quadrado de lado 12,7mm. Mantiveram-se as mesmas condições de contorno e do deslocamento aplicado, simulando um pistão plano de raio 6,35mm operando a 2MHz. As discretizações utilizadas são as determinadas na seção anterior, ou seja, 20 elementos por comprimento de onda e variação de tempo de 1/20 do período da onda. O tempo de propagação simulado foi de 8μs.

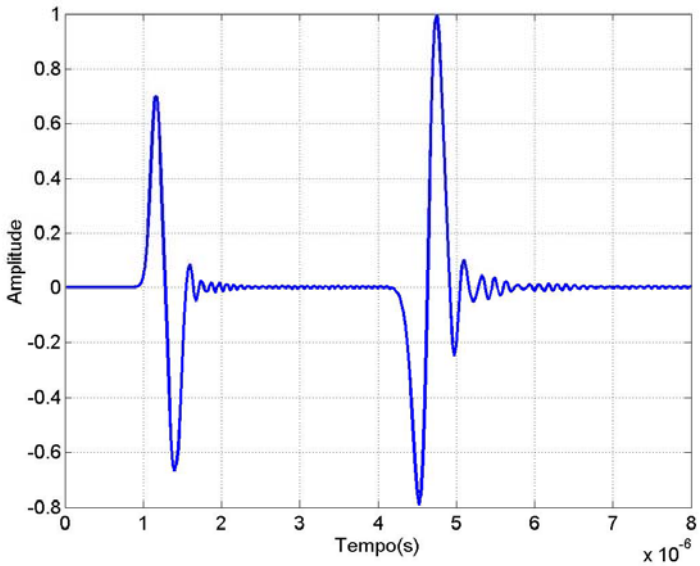
O sinal de deslocamento aplicado tem a mesma forma da fig.5.6. O tempo de duração da função do deslocamento varia de acordo com a freqüência central do

transdutor (ANEXO6). As propriedades dos materiais e dos elementos utilizados para a simulação encontram-se no ANEXO1.

Nos resultados da simulação no ANSYS, tem-se o campo de pressão gerado e pode-se plotar a forma de onda em qualquer ponto desse campo.



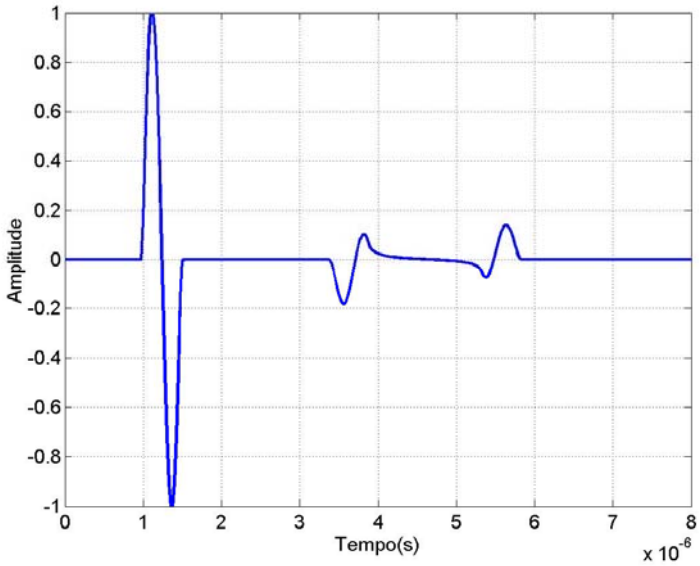
a)



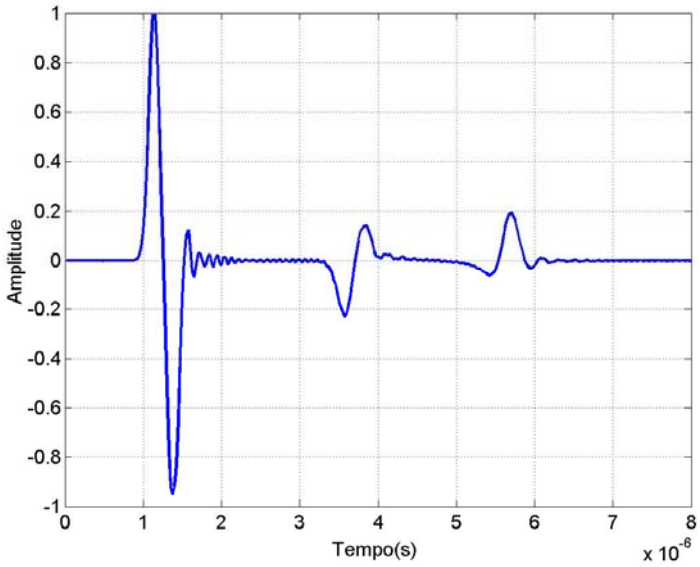
b)

Figura 5.9. Onda acústica no eixo e a 1,5mm de distância do transdutor de 2MHz e 12,7mm de diâmetro, a) modelo do pistão plano e b) modelo do ANSYS.

A fig.5.9(a) mostra os resultados obtidos do modelo teórico do pistão plano comparados com os resultados obtidos do modelo com elementos finitos, fig.5.9(b), para a onda de pressão no eixo a uma distância igual a um comprimento de onda (λ=1,5mm) da face do transdutor.



a)



b)

Figura 5.10. Onda acústica a 1,5mm fora do eixo e a 1,5mm de distância do transdutor, a) modelo do pistão plano e b) modelo do ANSYS.

Verifica-se a presença da onda plana e a onda de borda e a concordância no tempo de propagação das mesmas (WEIGHT, 1984). Observa-se também que nos resultados da simulação com elementos finitos a amplitude da onda de borda é maior que amplitude da onda plana.

Neste trabalho, as amplitudes dos resultados foram normalizadas para todas as comparações entre o modelo do MEF o da resposta impulsiva do pistão plano. Na fig.5.10, é mostrada a forma de onda de pressão para um ponto a 1,5mm fora do eixo de simetria, a uma distância de 1,5mm da face do transdutor. Observa-se a onda plana e as duas ondas de borda, a primeira, da borda mais próxima do ponto onde foram tomados os dados, e a segunda, da borda mais distante do mesmo ponto. Os resultados do modelo de Weight, fig.5.10(a) são comparados com os resultados simulados pelo MEF, fig.5.10(b).

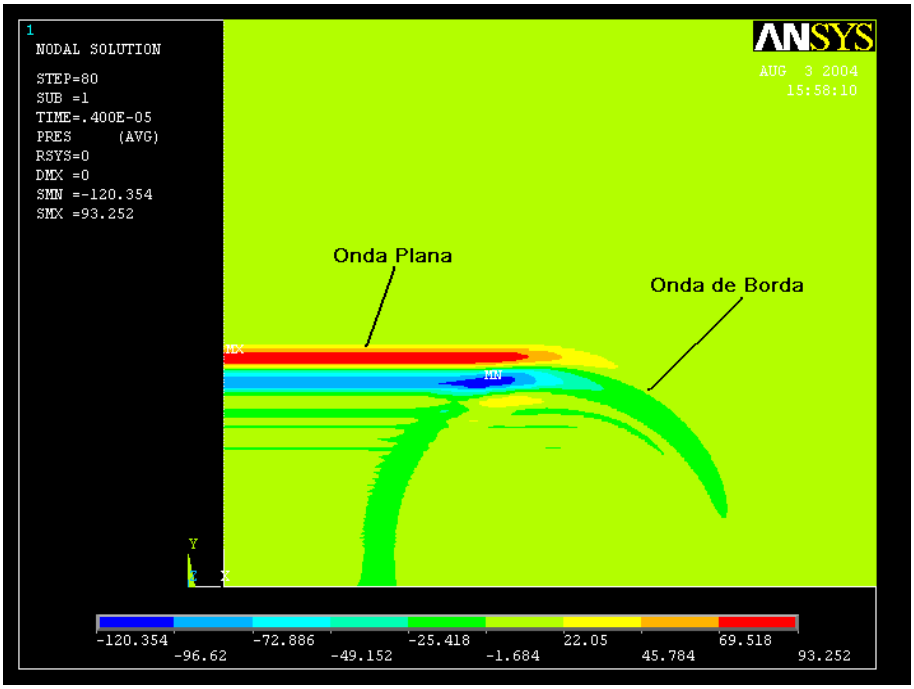


Figura 5.11. Onda acústica se propagando em água na frente do pistão plano e a 4μs (ANSYS).

Na fig.5.11 é apresentado o campo de pressões para o tempo de 4μs. Observam-se a onda de borda e a onda plana se propagando na frente da face do pistão plano.

Nos resultados das fig.5.9 e fig.5.10 observa-se um ruído de alta freqüência ao final das ondas plana e de borda, Esse comportamento deve-se à discretização no tempo, assim quanto menor o valor para Δt, menor é a amplitude do ruído. Na fig.5.12 se observa a plotagem da onda plana, obtida dos testes de convergência realizados para a discretização de 1/10, 1/15 e 1/30 do período da onda de 1 MHz.

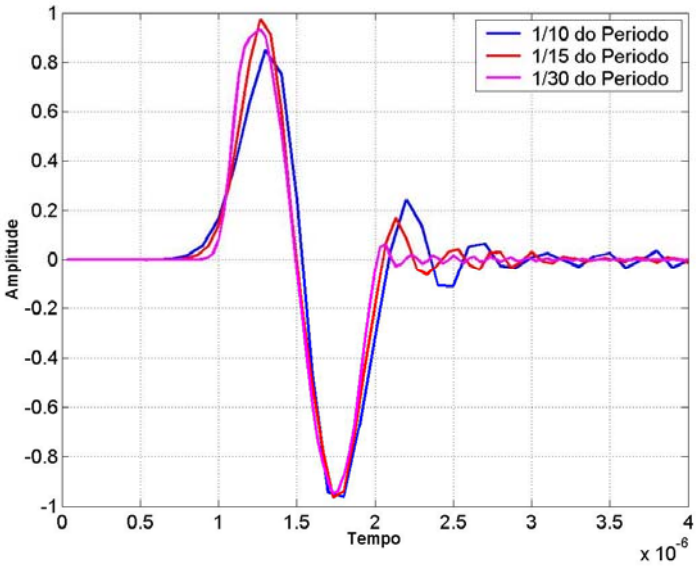


Figura 5.12. Formas de onda plana do pistão plano de 1 MHz, a 1,5mm de distância do pistão, para três valores de Δt na discretização no tempo.

5.4 Simulação da Propagação em Sólidos

Para a modelagem da propagação da onda acústica em sólidos considera-se um cilindro sólido de aço como mostrado na fig.5.13. As propriedades do material são descritas no ANEXO1, a partir dessas propriedades são calculadas a velocidade longitudinal (C_L=5900 m/s) e a velocidade transversal (C_T = 3200 m/s).

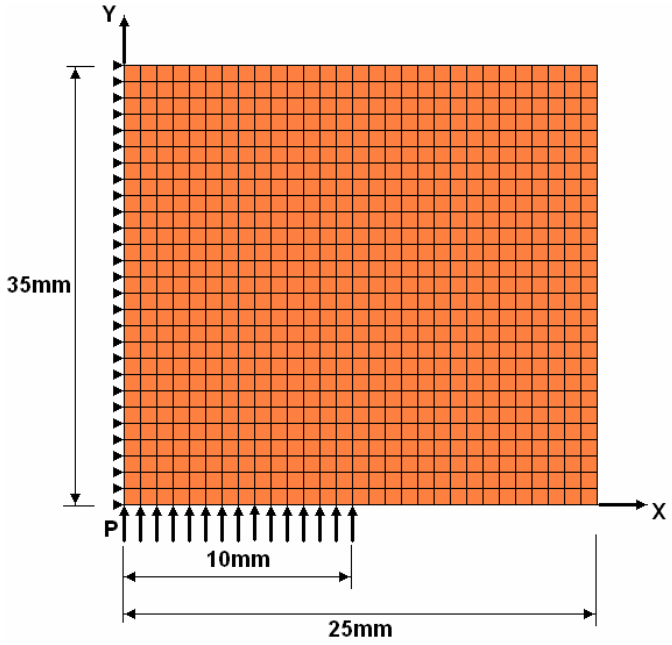


Figura 5.13. Esquema do modelo axi-simétrico para simulação do pistão plano radiando em aço.

Simulou-se um pistão plano de 10mm de raio, com uma freqüência central de 1MHz. A discretização adotada foi a determinada na seção 5.2. O tempo simulado de propagação foi de 10μs. As dimensões do cilindro foram de 35mm de espessura e 25mm de raio. A excitação do pistão plano foi simulada com uma função de pressão de um pulso só e obtida com a eq.(5.3), apresentada por Ilan (ILAN et al, 1990) e implementada em MATLAB (ANEXO8). A função de pressão é mostrada na fig.5.14. A excitação foi aplicada numa região da borda inferior do sólido.

$$P = sen(2\pi \cdot f \cdot t) - \frac{1}{2}(4\pi \cdot f \cdot t) \qquad (5.3)$$

Os resultados obtidos com esse modelo utilizando a análise transiente do ANSYS são mostrados na fig.5.15, que é um gráfico obtido com o valor da componente Y (direção de propagação) da velocidade da partícula a 5,0mm de distância do transdutor, no eixo de simetria. Verifica-se a onda de compressão plana, a onda de compressão da borda e a onda de cisalhamento da borda (WEIGHT, 1987).

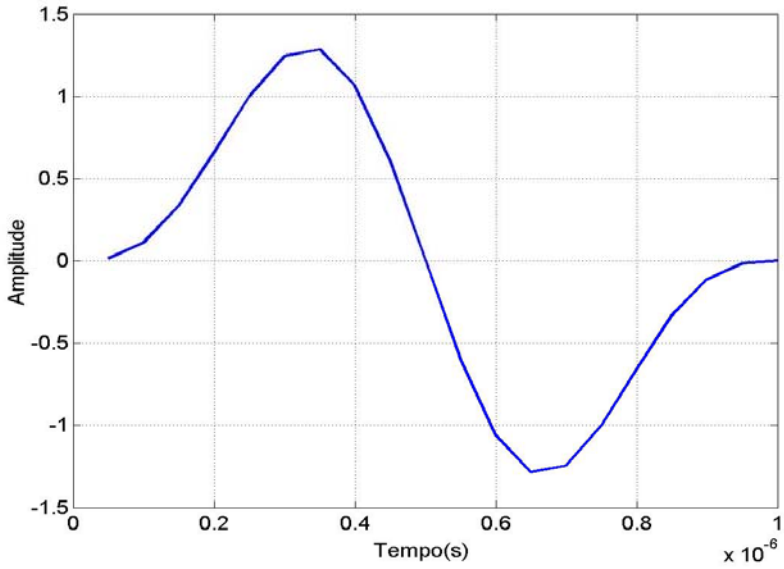


Figura 5.14. Função de pressão para simular o pistão plano em sólidos.

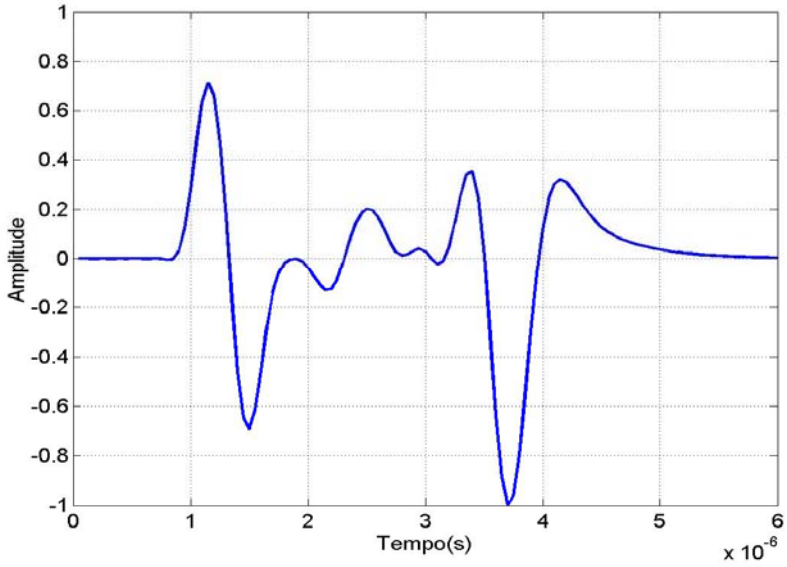


Figura 5.15. Onda acústica se propagando em aço, no eixo e a 5,0mm de distância do pistão plano (ANSYS).

Na figura 5.16, é apresentada o campo de deformações para 1,6μs mostrando a propagação da onda acústica em aço e simulada no ANSYS. Nessa figura verificam-se as três principais formas de onda que se apresentam na propagação em sólidos: a onda plana de compressão, a onda de cisalhamento da borda e a onda de compressão da borda. Os valores dos deslocamentos foram plotados numa escala de

cores representada pela legenda na parte inferior da figura. Segundo os resultados obtidos com o MEF para propagação da onda em sólidos, verifica-se o bom desempenho do modelo apresentado, assim, as formas de onda obtidas são iguais às obtidas em resultados experimentais e teóricos desenvolvidos em trabalhos anteriores (ILAN et al, 1990). As discretizações utilizadas são suficientes para gerar resultados muito aproximados.

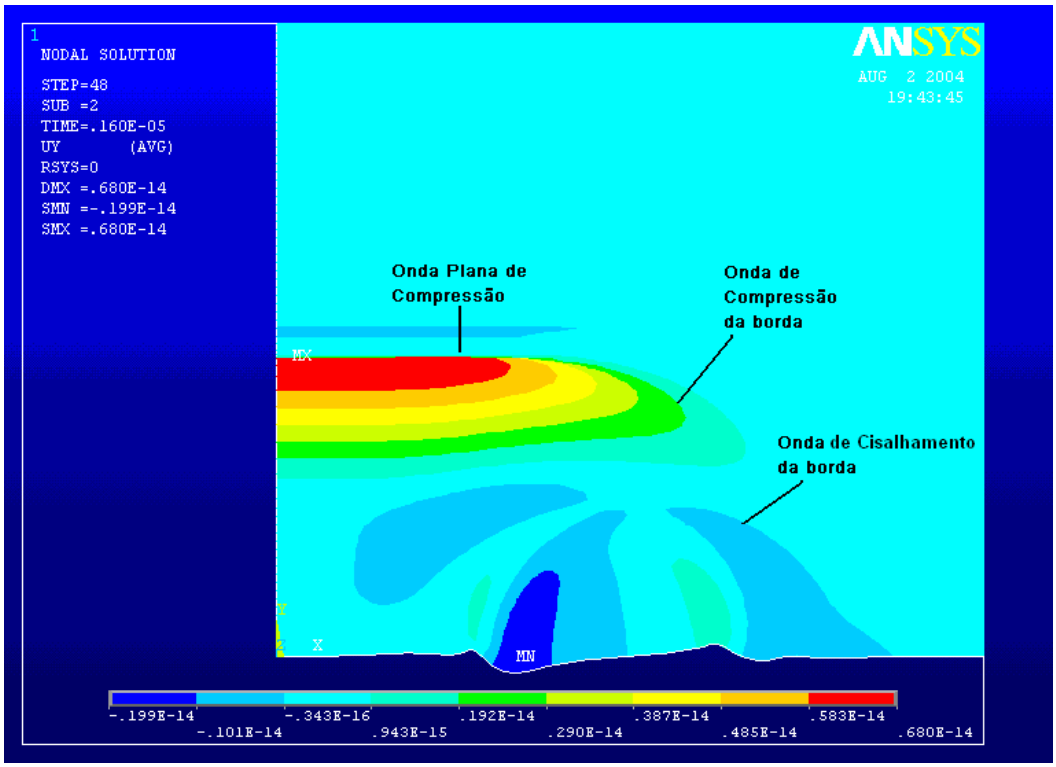


Figura 5.16. Onda acústica se propagando em aço na frente do pistão plano a 1,6 μs (ANSYS).

5.5 Modelos e Simulações para as amostras da camada de retaguarda

Como foi definido, o melhor resultado para a atenuação encontra-se na amostra de 25,7% de fração volumétrica de tungstênio. Assim, essa amostra foi modelada para determinar o seu coeficiente de amortecimento.

Tabela 5.1. Propriedades para mistura de 25,7% de fração volumétrica de Tungstênio (Temp: 21º , Freq: 1MHz).

Densidade (kg/m3)	5766,14
Veloc. Long. (m/s)	1349,5
Veloc. Trans. (m/s)	659
Modulo de Young *E*	1,05e10
Coef. Poisson σ	0,343
Atenuação dB/cm	13,47

Para essas condições de mistura apresentam-se os valores das variáveis medidas e calculadas que são mostradas na tabela 5.1. O modelo implementado é apresentado na fig.5.17. Consiste de um modelo axi-simétrico de forma retangular, com condições de contorno nas bordas laterais de deslocamento na direção X igual a zero, já que se deseja medir a atenuação somente da onda longitudinal. Para realizar a simulação, aplicou-se um sinal de deslocamento na parte inferior do modelo, consistindo de vários ciclos de seno gerados no MATLAB. O código se encontra no ANEXO5.

Os modelos foram desenvolvidos para determinar o coeficiente de amortecimento do material, já que é difícil determiná-lo teoricamente e implicaria muito trabalho fazê-lo experimentalmente. Assim decidiu-se fazer algumas simulações em que foi ajustando o valor do amortecimento β do material para se conseguir uma igualdade no valor de atenuação dado na tabela 5.1. As amplitudes do deslocamento gerado no interior do material foram consideradas a 1,0cm da superfície de excitação em que foi aplicado o deslocamento inicial. O sinal de excitação foi de 4 ciclos de seno numa freqüência central de 1MHz.

Após varias simulações de análise transiente conseguiu-se determinar o coeficiente de amortecimento que ajustasse a atenuação do modelo à atenuação experimental. Determinou-se uma variação linear entre o coeficiente de amortecimento e a atenuação da amostra como mostrado na fig.5.18. Por esse motivo utilizou-se a interpolação linear para determinar com exatidão o valor do coeficiente β para a atenuação experimental. Assim o valor de $\mathbf{1{,}55x10^{-8}}$ corresponde a uma atenuação de 13,47 dB/cm para o material analisado. Para os modelos posteriores do transdutor piezelétrico utilizam-se as propriedades da amostra modelada, pois tem as melhores características de atenuação.

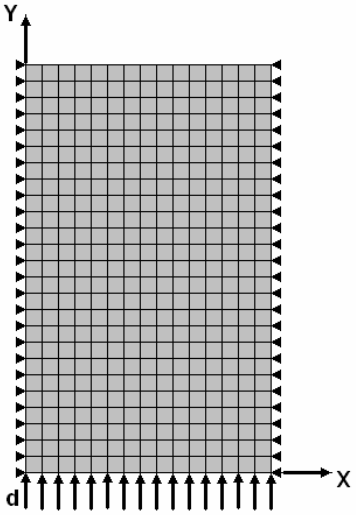


Figura 5.17. Esquema do modelo das amostras da camada de retaguarda para simulação no ANSYS.

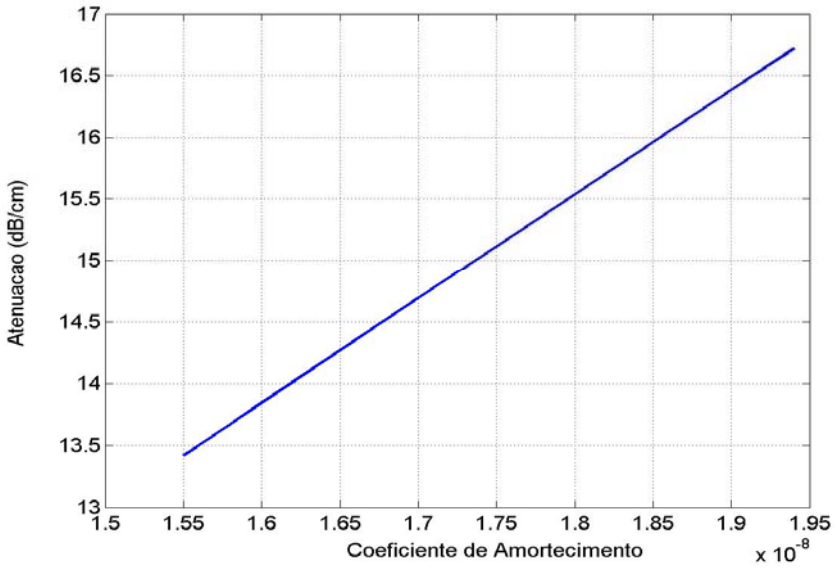


Figura 5.18. Curva de Atenuação em função do coeficiente de amortecimento para uma mistura de 25,7% de fração volumétrica de tungstênio.

5.6 Modelo da cerâmica piezelétrica

A cerâmica piezelétrica é modelada com as medidas reais da cerâmica PZT5A testada em laboratório e utilizada para a construção do transdutor deste trabalho, tendo 12,7mm de diâmetro e 0,97mm de espessura, freqüência 2MHz. O

modelo desenvolvido é axi-simétrico, fig.5.19, o tamanho dos elementos está fora da escala real somente para o entendimento do modelo. As propriedades do material utilizadas no modelo são as fornecidas pelo fabricante (ANEXO1). Os eletrodos são simulados acoplando os nós das faces superior e inferior da cerâmica piezelétrica. Para determinar o coeficiente de amortecimento aproximado da cerâmica foram utilizadas as eq.(2.33) e eq.(2.34), mediu-se as freqüências f_r, f_1 e f_2 das curvas reatância e resistência obtidas no impedômetro segundo o método utilizado por Nader (NADER, 2002). A análise harmônica foi executada aplicando-se uma voltagem de 1,0V numa das faces da cerâmica e 0V na outra face. Os resultados da curva de impedância elétrica e de fase da simulação feita com esse primeiro coeficiente de amortecimento não foram muito satisfatórios, pois os valores das freqüências de ressonância e anti-ressonância não apresentavam uma boa aproximação.

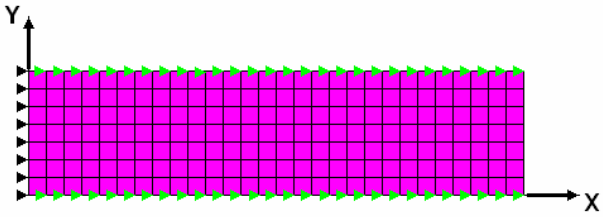


Figura 5.19. Esquema do modelo da cerâmica piezelétrica para simulação no ANSYS.

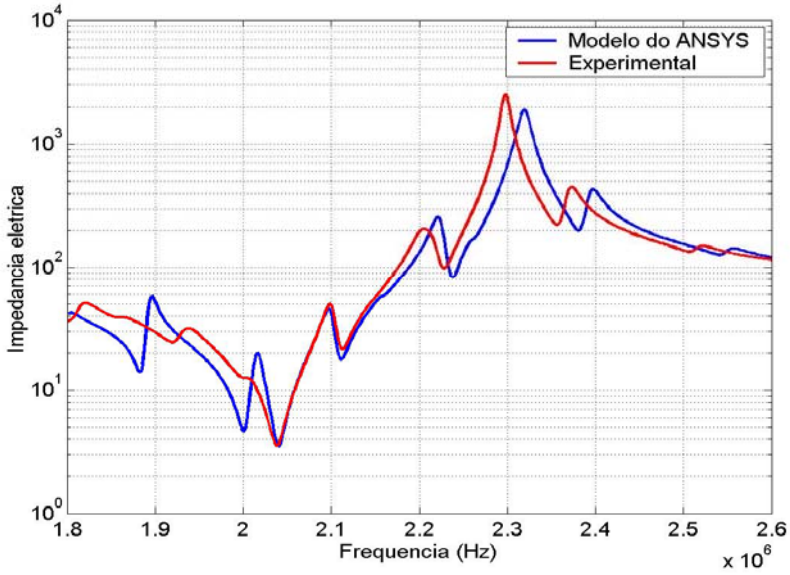


Figura 5.20. Curva de Impedância Elétrica simulada e experimental para uma cerâmica PZT5A de 2MHz e β=5,3e-10.

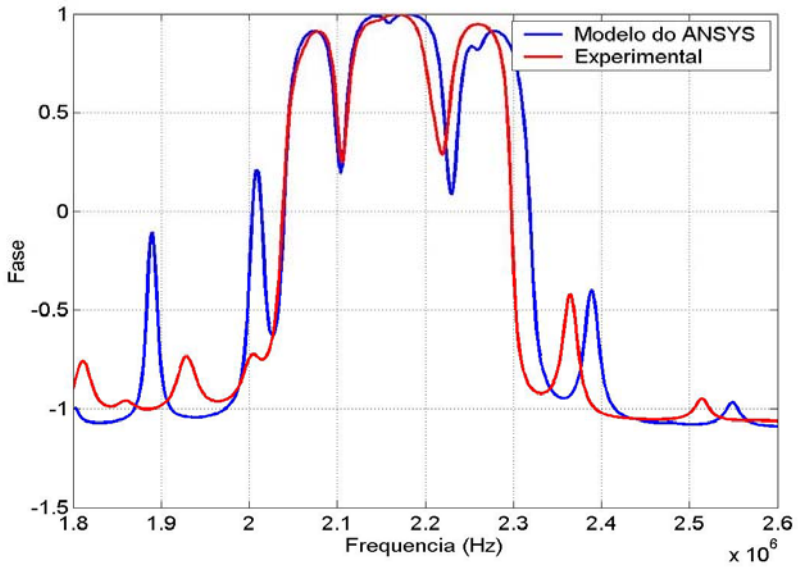


Figura 5.21. Curva de Fase simulada e experimental para uma cerâmica PZT5A de 2 MHz e β= 5,3x10^{-10}.

Assim sendo, ajustou-se o coeficiente β até se obter uma boa aproximação aos resultados experimentais. Esses resultados são mostrados nas fig.5.20 e fig.5.21 para a impedância e fase da cerâmica com β=5,3x10^{-10}. Esse valor determinado foi utilizado para os modelos posteriores do transdutor piezelétrico.

5.7 Modelo do transdutor piezelétrico para ENDUS

A fig.5.22 apresenta o diagrama esquemático do modelo do transdutor de ultra-som implementado no ANSYS. Como o transdutor tem forma circular o modelo pode ser simplificado para um modelo axi-simétrico. Assim a malha de elementos finitos pode ser restrita à metade da configuração real. No ANSYS o eixo de simetria do modelo é o eixo Y.

As medidas do modelo foram as mesmas do transdutor desenvolvido no laboratório da seção 3.3.5. Todos os componentes do modelo foram modelados com elementos planos axi-simétricos. Foram utilizadas as mesmas propriedades da cerâmica piezelétrica PZT5A da seção 5.6. As propriedades dos materiais dos demais componentes do transdutor foram obtidas experimentalmente utilizando a técnica de emissão recepção da seção 3.3.3.

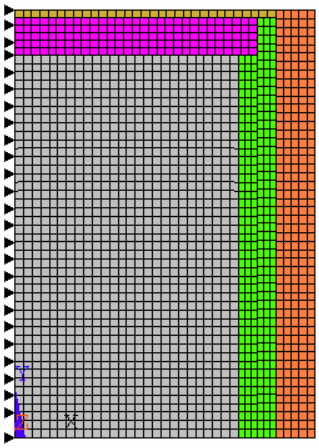


Figura 5.22. Diagrama do modelo axi-simétrico do transdutor piezelétrico.

Tabela 5.2. Resumo dos parâmetros relevantes dos materiais usados no modelo.

PZT5A *		Valor	Unidade
Constantes Piezelétricas	d31	-175	10^{-12} m/V
	d33	400	
	d15	590	
Constantes Elásticas	c11	12,1	10^{10} N/m^2
	c12	7,54	
	c13	7,52	
	c33	11,1	
	c44	2,11	
	c66	2,26	
Constantes Dielétricas	ε33/ε0	830	---
	ε11/ε0	916	
Densidade		7650	kg/m^3
β Amortecimento		5,3x10^{-10}	---
Araldite *			
Densidade		1096	kg/m^3
Coeficiente de Poisson		0,34	---
Módulo de Elasticidade		0,55	10^{10} N/m^2
β Amortecimento		2,3 x10^{-8}	---

Araldite/Tungstênio *	Valor	Unidade
Densidade	5766	kg/m^3
Coeficiente de Poisson	0,34	---
Módulo de Elasticidade	1,05	10^{10} N/m^2
β Amortecimento	1,5 x10^{-8}	---
Nylon *		
Densidade	1405	kg/m^3
Coeficiente de Poisson	0.27	---
Módulo de Elasticidade	0,74	10^{10} N/m^2
β Amortecimento	5 x10^{-9}	---
Aço **		
Densidade	7890	kg/m^3
Coeficiente de Poisson	0,29	---
Módulo de Elasticidade	26,5	10^{10} N/m^2
β Amortecimento	10 x10^{-8}	---
Água **		
Densidade	998	kg/m^3
Coeficiente de Atrito	0	---
Velocidade do Som	1500	m/s

* Propiedades medidas ou calculadas neste trabalho.
** Propriedades obtidas do trabalho de (NADER, 2002).

Os coeficientes de amortecimento para cada material foram determinados com simulações similares à seção 5.5. A tabela 5.2 apresenta-se um resumo das

propriedades dos materiais utilizados. Os parâmetros dessa tabela foram colocados no código para a modelagem no ANSYS. O código é apresentado no ANEXO1.

A malha desenvolvida no ANSYS foi otimizada de maneira que cada material tenha um tamanho de elemento diferente. Esse tamanho foi definido de acordo com os parâmetros estabelecidos da seção 5.2 para a discretização de 20 elementos por comprimento de onda.

5.8 Simulações de transmissão para o modelo do transdutor piezelétrico

Foi implementado um modelo para a propagação da onda acústica em meio líquido, como mostra a fig.5.23. O meio consiste num cilindro líquido de 12,7mm de raio e 12,7mm de espessura. O modelo do transdutor de 2MHz aplicado foi o utilizado na seção anterior e o modelo do meio líquido tem as mesmas condições de contorno que as seções 5.2 e 5.3. Foi aplicado um pulso de meio seno de voltagem para excitar a cerâmica e foi implementado com um código de MATLAB que se encontra no ANEXO8. Esse sinal possui a mesma freqüência da cerâmica piezelétrica e tem um tempo de duração de 9μs.

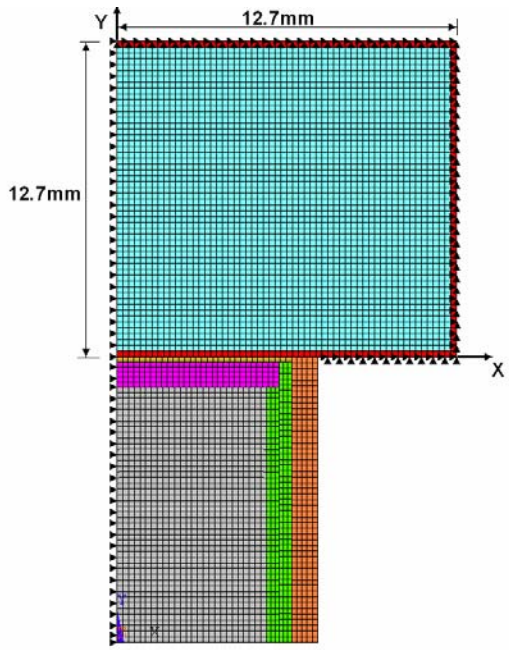
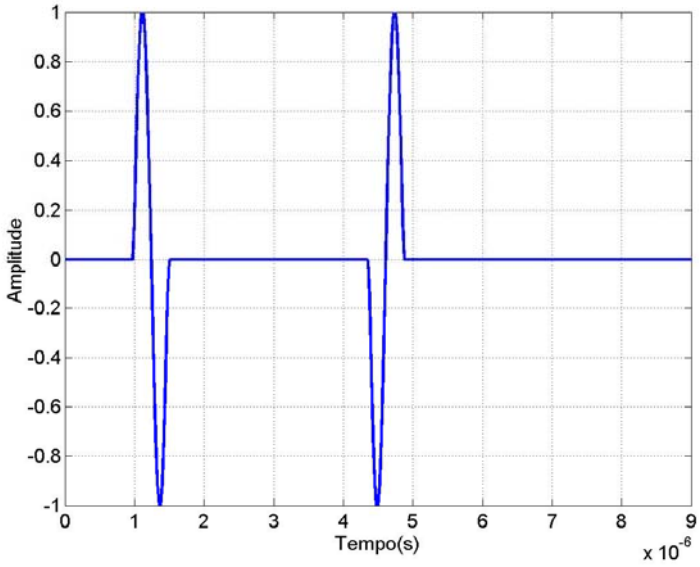
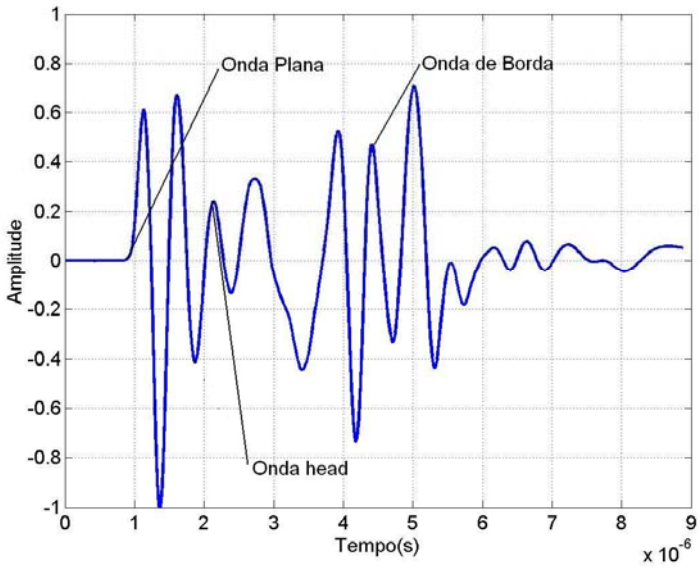


Figura 5.23. Diagrama do modelo axi-simétrico do transdutor piezelétrico acoplado ao meio líquido.

Os resultados dessa simulação foram comparados com os resultados do pistão plano (WEIGHT, 1984). Assim na fig.5.24(a) e (b) e fig.5.25(a) e (b) são mostrados os resultados da forma de onda de pressão do modelo do pistão plano e do modelo do MEF no eixo do transdutor e a 1,5mm e 3,0mm respectivamente. Todos os resultados



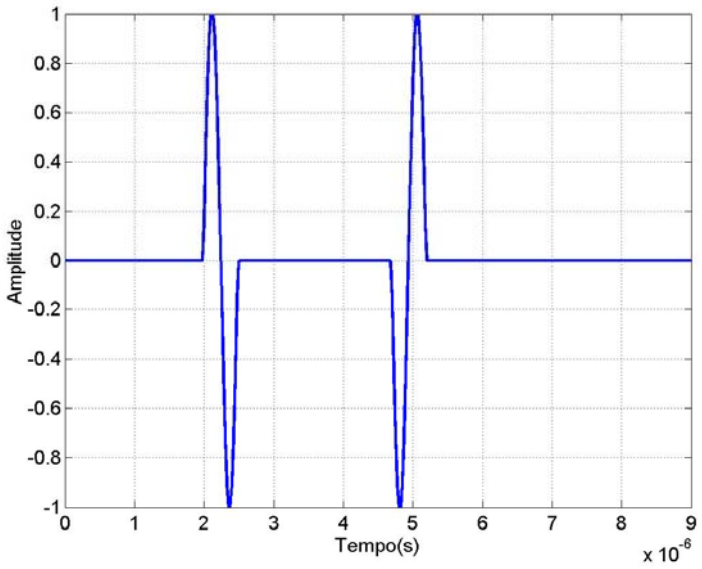
a)



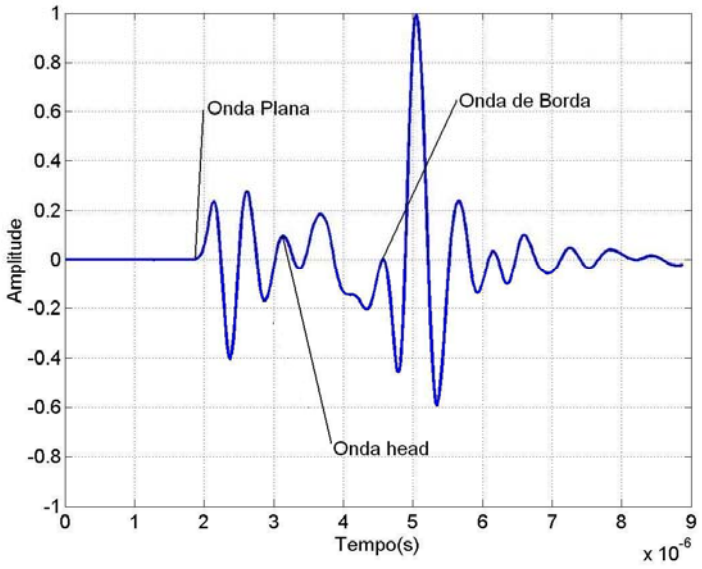
b)

Figura 5.24. Forma de onda de pressão no eixo acústico para um transdutor de 12,7mm de diâmetro e 2MHz numa distância de 1,5mm da superficie, a) modelo do pistão plano e b) modelo do ANSYS.

obtidos foram normalizados em relação à amplitude. Nesses dois resultados verificam-se com clareza as ondas plana, *head* e de borda. Na fig.5.25(b) aparece claramente definida a onda de borda. Já na fig.5.24(b) o comportamento da onda de



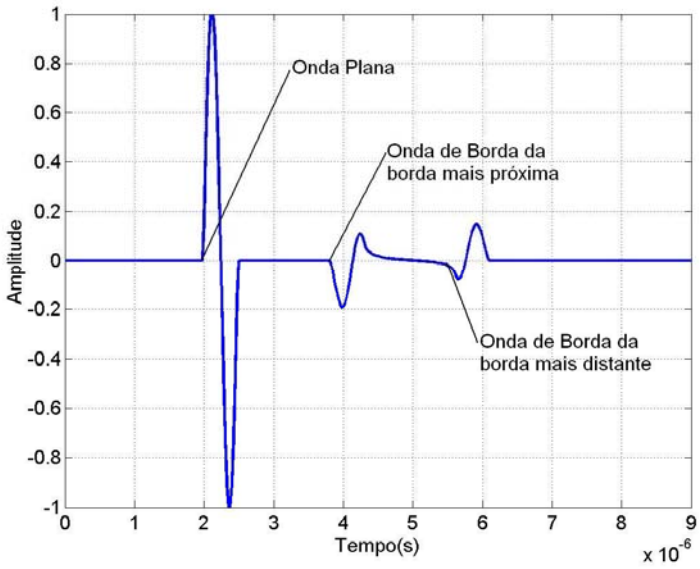
a)



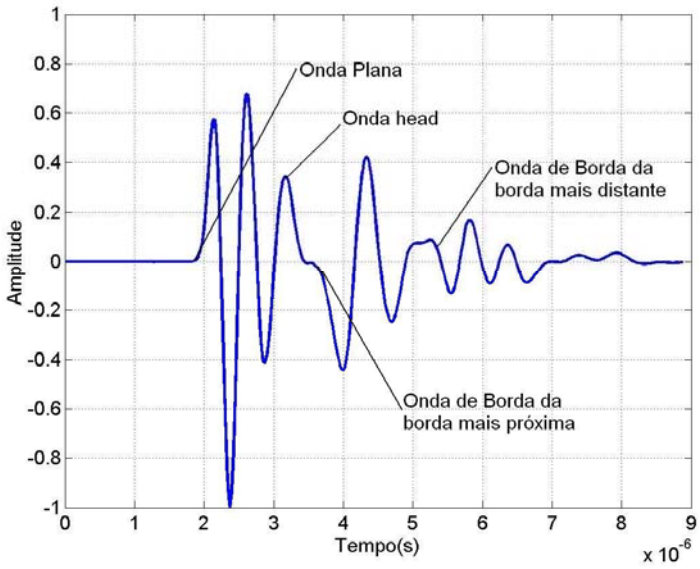
b)

Figura 5.25. Forma de onda de pressão no eixo acústico para um transdutor de 12,7mm de diâmetro e 2MHz numa distância de 3,0mm da superfície, a) modelo do pistão plano e b) modelo do ANSYS.

borda difere para ambos os modelos. Provavelmente isso se deve ao fato que nessa região do campo gerado a onda *head* tem uma velocidade um pouco maior que a onda de borda causando interferência nessa onda.



a)



b)

Figura 5.26. Forma de onda de pressão 1,5mm fora do eixo acústico de um transdutor de 12,7mm de diâmetro e 2MHz numa distancia de 3,0mm da superfície, a) modelo do pistão plano e b) modelo do ANSYS.

Na fig.5.25(b) a amplitude da onda de borda é maior que a amplitude da onda plana. Esse comportamento é causado pela interferência da onda *head* na onda de borda. As curvas foram normalizadas em relação à amplitude para melhor entendimento do comportamento da onda acústica.

Na fig.5.26(a) e (b) é mostrada a forma de onda de pressão para um ponto alocado a 3,0mm de distância da face to transdutor e 1,5mm fora do eixo acústico. Nesse ponto aparecem duas ondas de borda, a primeira proveniente da borda mais próxima e a segunda da borda mais distante do transdutor (WEIGHT, 1984). No resultado da simulação com MEF, fig.5.26(b), a onda de *head* aparece entre a onda plana e a primeira onda de borda causando interferência nessa onda e aumentando sua amplitude.

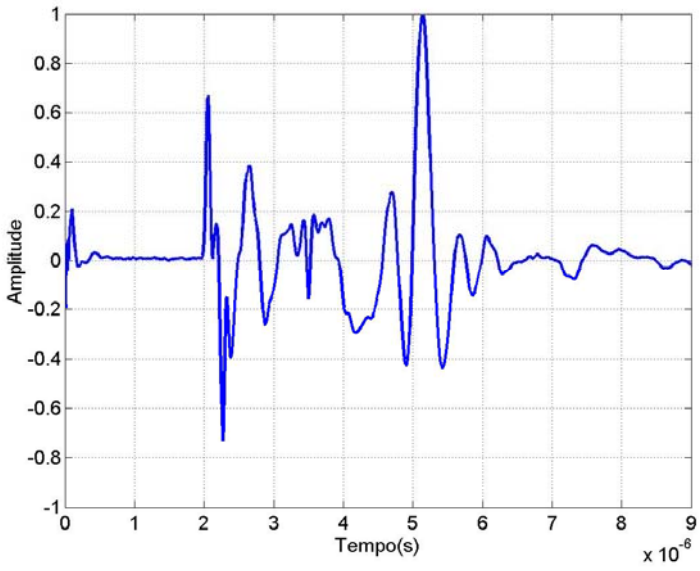


Figura 5.27. Forma de onda de pressão experimental no eixo acústico do transdutor de 2MHz a 3,0mm da superfície excitado com sinal de pulso estreito.

Os resultados da simulação com MEF foram comparados com os resultados experimentais do transdutor montado em laboratório. Os testes experimentais foram feitos em tanque de imersão com água para medir a forma de onda através do hidrofone. Assim a fig.5.27 mostra os resultados experimentais para o transdutor de 2MHz, num ponto no eixo a 3,0mm da face do transdutor. As ondas plana, de borda

e *head* apresentam boa aproximação tanto em relação ao tempo e amplitude na comparação dos resultados experimentais e simulados, fig.5.25(b). Novamente a amplitude da onda de borda é maior que a da onda plana devido à interferência com a onda *head*. A amplitude obtida nos resultados experimentais pode ser afetada também pela diretividade do hidrofone. Os resultados dessa figura são muito aproximados já que os sinais de excitação são parecidos.

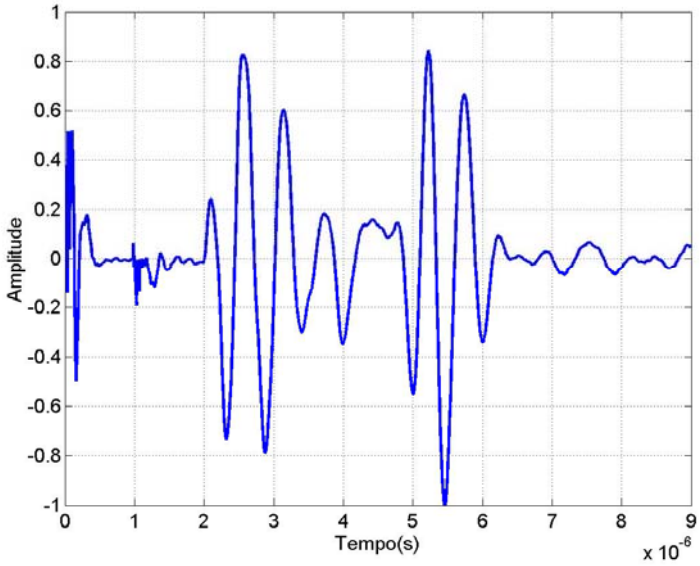


Figura 5.28. Forma de onda de pressão experimental no eixo acústico do transdutor de 2MHz a 3,0mm da superfície excitado com sinal de um seno.

Na fig.5.28 se apresenta a forma de onda acústica num ponto no eixo a 3,0mm da superfície do transdutor de 2MHz. Nesse teste experimental utilizou-se como sinal de excitação um sinal de um seno. Assim, pode se observar no resultado experimental que a onda plana tem mais ciclos e a onda *head* possui forma diferente em relação aos resultados da simulação do MEF, fig.5.25(b). A onda *head* interfere com a onda de borda diminuindo sua amplitude. Essas diferenças entre os resultados são ocasionadas pela diferença de sinais de excitação do transdutor no modelo e no experimento. As amplitudes dos resultados experimentais podem ter variação por causa da diretividade do hidrofone. Verifica-se então que será necessário utilizar o mesmo padrão de sinal para a melhor comparação dos resultados experimentais e simulados.

5.9 Simulação de recepção para o modelo do transdutor piezelétrico

Na seção anterior foi comprovado que o modelo do transdutor desenvolvido é eficaz para emitir a onda de ultra-som. Nesta seção comprova-se a capacidade do modelo atuar como receptor de sinal. Assim desenvolveu-se um modelo axi-simétrico do transdutor da seção 5.7 acoplado a uma fina camada de água de espessura 1,0mm, fig.5.29. O transdutor foi mantido sem excitação, mas com aplicação de voltagem 0V numa das faces para que possa receber sinal. A onda de ultra-som que se propaga na água em direção ao transdutor foi gerada com um deslocamento aplicado simulando um emissor tipo pistão plano de 1,5mm de raio e 2MHz de freqüência central (ANEXO10).

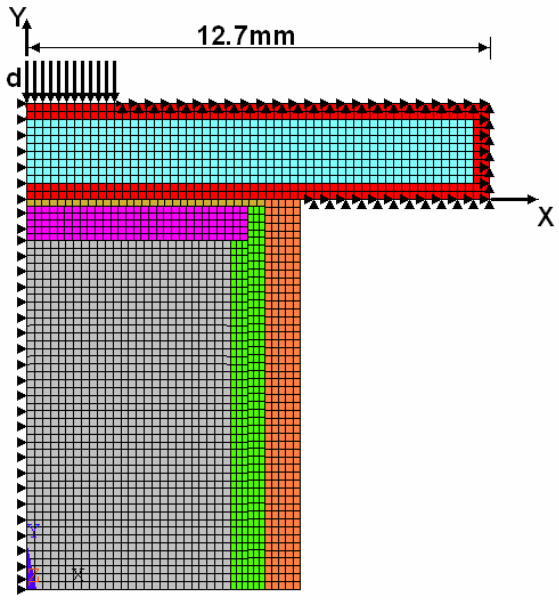


Figura 5.29. Modelo axi-simétrico para recepção do transdutor de ultra-som.

Os resultados desse modelo são apresentados na fig.5.30. Comprova-se que o modelo do transdutor recebe o pulso proveniente e gera um sinal elétrico. O tempo em que a onda leva para atingir o transdutor coincide exatamente com os cálculos manuais tomando em conta que a velocidade de propagação da onda de ultra-som é de 1500 m/s e para a espessura da camada de água de 1,0mm equivale a um tempo de 0,66μs. Observa-se nessa figura um pulso curto que atenua rapidamente no tempo.

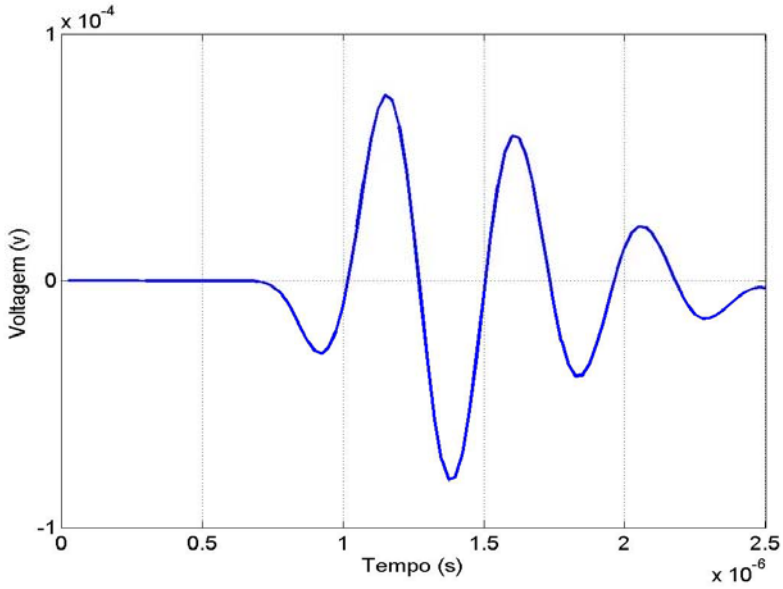


Figura 5.30. Forma de onda de voltagem gerada na recepção da onda acústica no modelo do transdutor no ANSYS.

5.10 Simulações Pulso-Eco incluindo o transdutor piezelétrico

Os modelos axi-simétricos desenvolvidos de pulso-eco simulam testes de peças com e sem defeitos em tanque de imersão e com acoplamento direto. Foram desenvolvidos testes experimentais com o transdutor de 2MHz desenvolvido em laboratório e com o transdutor de 2,25MHz comercial. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados das simulações com MEF. O material da peça testada foi alumínio com as características apresentadas na tabela 5.3 (ANEXO1):

Tabela 5.3. Parâmetros relevantes do alumínio usado na modelagem.

Alumínio	Valor	Unidade
Densidade	2800	kg/m^3
Coeficiente de Poisson	0,34	---
Módulo de Elasticidade	$6,87 \times 10^{-10}$	10^{10} N/m^2
β Amortecimento	$2,3 \times 10^{-9}$	---

Nas simulações pulso-eco foi aplicado um sinal de voltagem de excitação de pulso curto como na fig.5.31, esse sinal foi gerado no MATLAB (ANEXO10). A amplitude máxima foi de 200V e tempo de duração de $5,5 \times 10^{-7}$ segundos.

O primeiro modelo foi desenvolvido para teste pulso-eco de acoplamento direto numa peça de alumínio com 15,86mm de espessura e sem defeitos. O esquema do modelo se mostra na fig.5.32. Os resultados da simulação com MEF foram comparados com os resultados experimentais na fig.5.33(a) e (b).

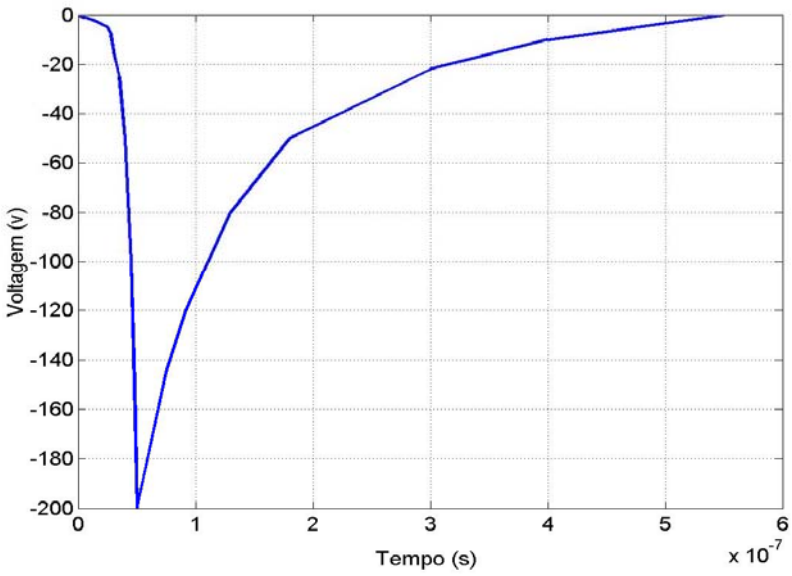


Figura 5.31. Pulso estreito de excitação do transdutor.

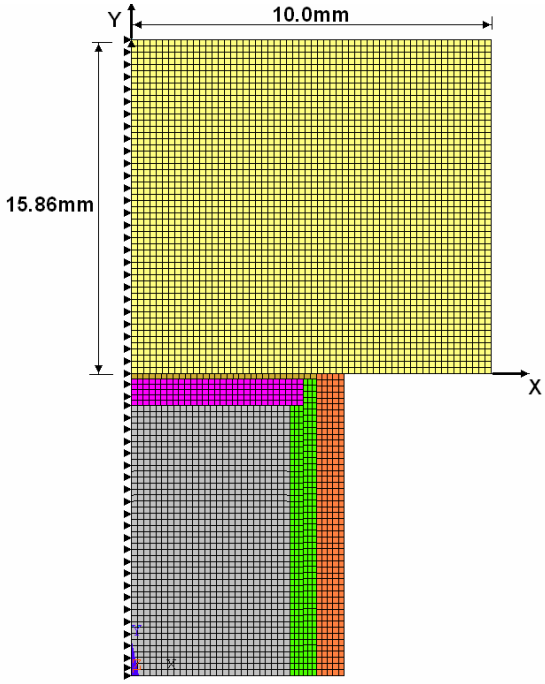
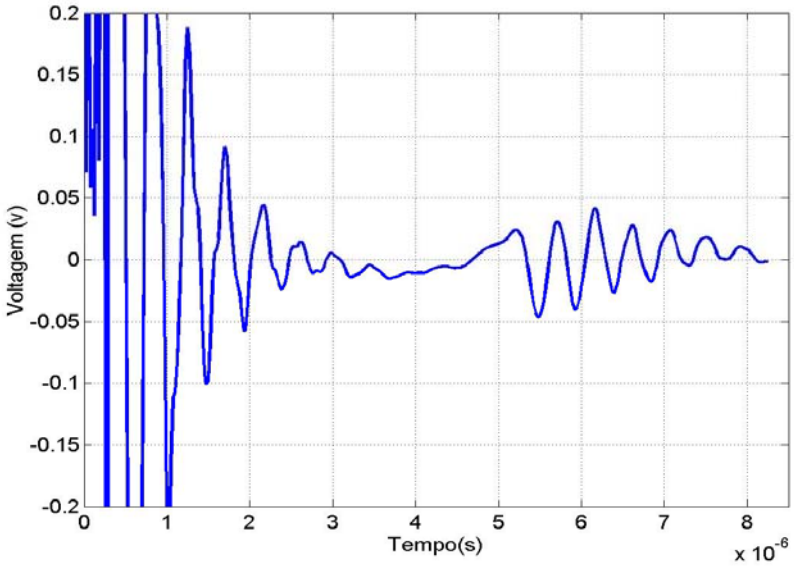
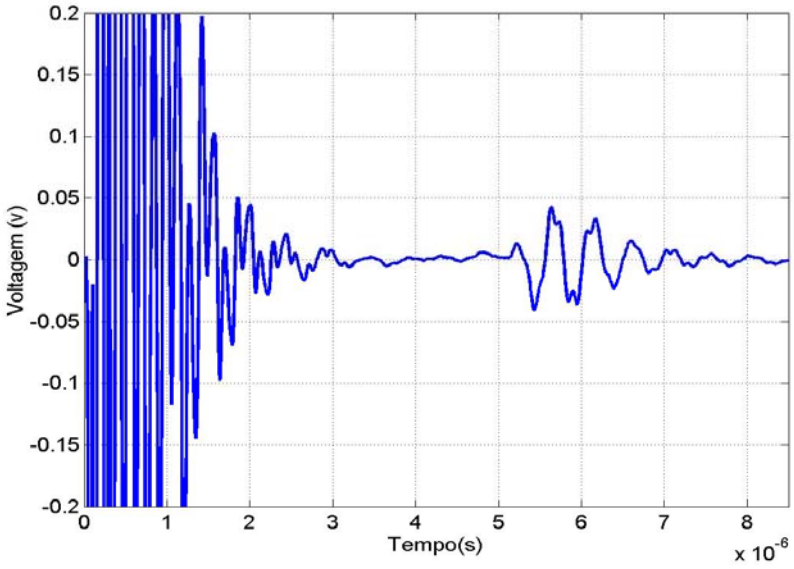


Figura 5.32. Modelo axi-simétrico para simulação de pulso-eco com acoplamento direto para uma peça de alumino de 15,86mm de espessura.

As amplitudes da voltagem foram normalizadas e o sinal recebido na simulação foi filtrado nas baixas freqüências para a melhor visualização dos resultados. O eco que aparece a pouco mais de 5μs é gerado pela parede posterior da peça.



a)



b)

Figura 5.33. Sinal do eco produzido por uma peça de alumínio de 15,86mm de espessura com transdutor de 2MHz, a) modelo do ANSYS e b) resultado experimental.

Observa-se que o modelo desenvolvido apresenta baixas freqüências de vibração que interferem no sinal recebido. Essas baixas freqüências são devidas aos modos radiais de vibração da cerâmica piezelétrica.

Na fig.5.34 são apresentados os resultados experimentais para o transdutor comercial de 2,25 MHz, nas mesmas condições da simulação com MEF. Comparando essa figura com a fig.5.33 (b), pode-se observar que o ring do transdutor desenvolvido em laboratório é maior que o do comercial, ou seja, o sinal do transdutor de 2 MHz amortece mais lentamente que o comercial. Este comportamento se deve ao fato que o transdutor comercial testado possui como elemento piezelétrico uma cerâmica de metaniobato de chumbo e provavelmente um casamento de impedância elétrica para melhorar o “ring” do mesmo. Já no transdutor desenvolvido em laboratório utilizou-se PZT5A que apresenta menor amortecimento mecânico.

Foram desenvolvidos também testes experimentais com peças de menor espessura. Assim, para os testes com o transdutor de PZT5A, os ecos produzidos eram difíceis de se identificar por causa do ring desse transdutor, o que não aconteceu nos testes com o transdutor comercial. Verifica-se a necessidade de cerâmicas que amorteçam rapidamente para a utilização em transdutores de ENDUS.

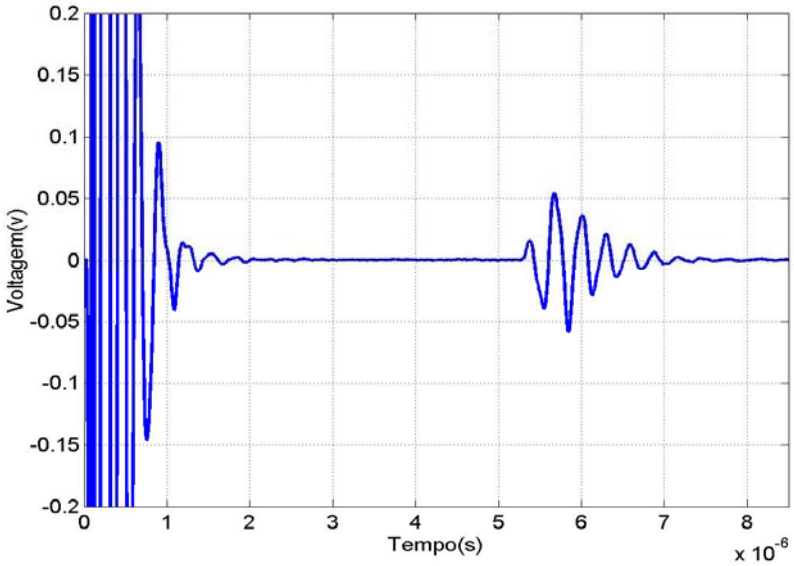


Figura 5.34. Sinal experimental do eco gerado por uma peça de alumínio de 15,86mm de espessura para o transdutor de 2,25 MHz.

O segundo modelo desenvolvido para pulso-eco simula o teste de uma peça sem defeitos de alumínio de 34,7mm de espessura em tanque de imersão. A peça foi colocada a 3,0mm de distância do transdutor utilizando como meio de acoplamento água como mostra o esquema da fig.5.35.

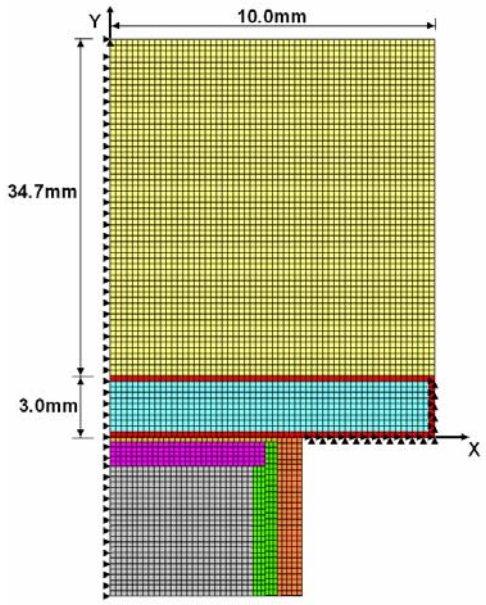


Figura 5.35. Modelo para simulação de pulso-eco de uma peca de alumínio de espessura 34,7mm, em tanque de imersão.

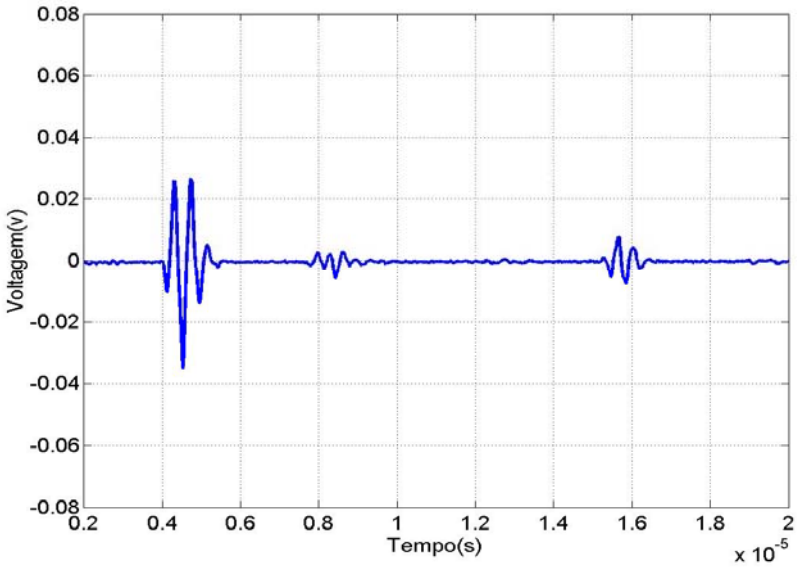
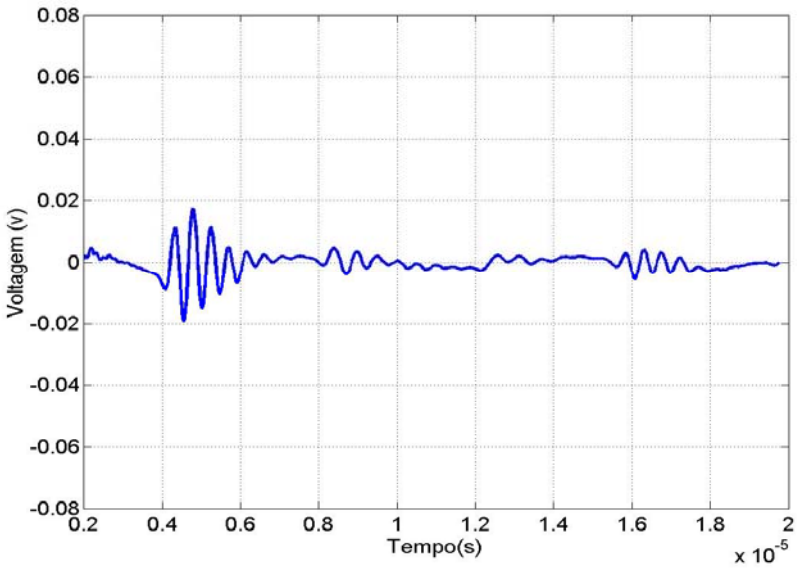
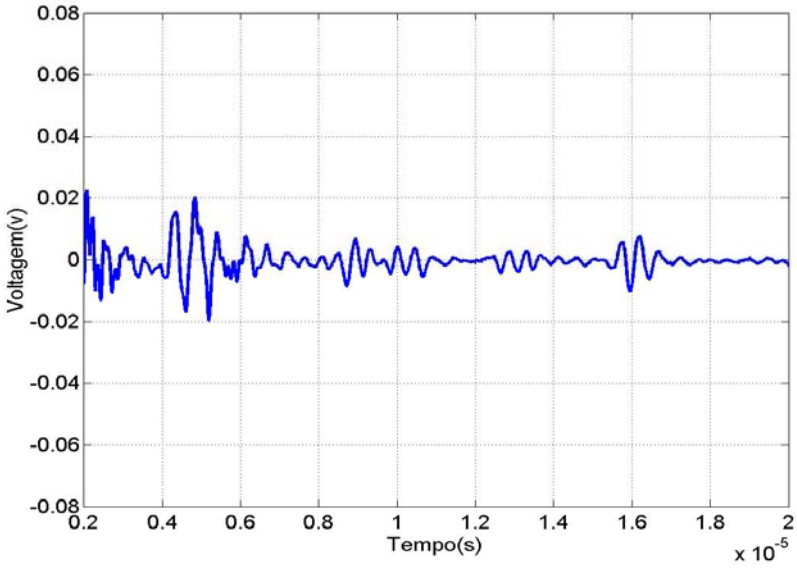


Figura 5.36. Ecos experimentais gerados de uma peça de alumínio de 34,7 mm de espessura em tanque de imersão para o transdutor de 2,25 MHz.

A fig.5.36 mostra os ecos produzidos pela peça para o transdutor comercial de 2,25 MHz, o primeiro eco aparece a 4 μs e corresponde à reflexão causada pela primeira parede da peça.



a)



b)

Figura 5.37. Ecos gerados por uma peça de alumínio de 34,7 mm de espessura em tanque de imersão para o transdutor de 2 MHz, a) modelo do ANSYS e b) resultado experimental.

Esse primeiro eco é de grande amplitude, pois somente uma pequena parte da onda é transmitida para dentro da peça e a outra retorna em direção ao transdutor. Os seguintes dois ecos de pequena amplitude que aparecem nos tempos de 8μs e 12μs são as reflexões da onda que vai e volta do transdutor à peça e da peça ao transdutor. Observa-se que a última reflexão possui uma amplitude muito baixa e não atrapalha o quarto eco que corresponde ao eco produzido pela parede posterior da peça.

Na fig.5.37(a) e (b) apresenta-se a comparação dos resultados da simulação desenvolvida com o modelo do MEF da fig.5.35 e os testes experimentais com transdutor de 2 MHz, respectivamente. O sinal recebido da simulação foi filtrado nas baixas freqüências, na freqüência de corte de 50 KHz, e a amplitude dos sinais foi normalizada em relação à voltagem. Os resultados da simulação mostram boa aproximação aos resultados experimentais. Verifica-se a presença de baixas freqüências nos resultados obtidos da simulação.

O terceiro modelo de pulso-eco desenvolvido consiste numa peça de alumínio contendo um furo de 5 mm de diâmetro no eixo e com uma profundidade de 15,9 mm. A peça possui uma espessura de 32,1 mm e 15 mm de raio, e é acoplada diretamente ao transdutor, fig.5.38.

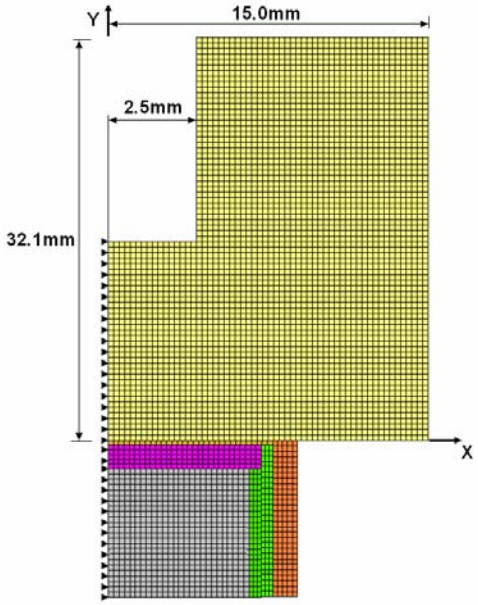


Figura 5.38. Modelo para simulação de pulso-eco de uma peca de alumínio com defeito e 32,1 mm de espessura e acoplamento direto.

A fig.5.39 mostra os resultados experimentais do transdutor de comercial de 2,25 MHz, obtidos para as condições do modelo descrito acima. Observam-se claramente a posição dos ecos no tempo Na fig.5.40(a) e (b) comparam-se os resultados da simulação com MEF e experimentais respectivamente. Verificam-se a existência de vibrações em baixa freqüência para ambos os casos que se devem a vibrações laterais da cerâmica desse transdutor. O eco produzido pelo furo existente na peça se mistura com as baixas freqüências existentes. No resultado experimental essas vibrações atenuam mais rápido em comparação aos resultados da simulação.

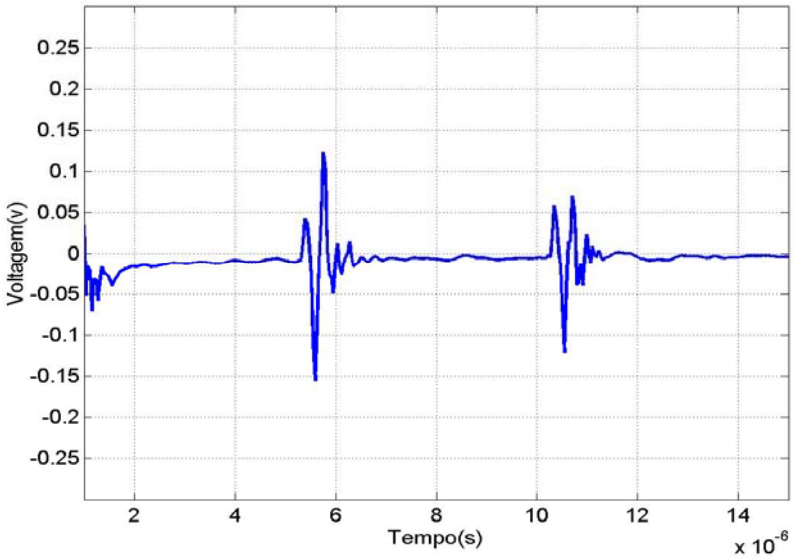
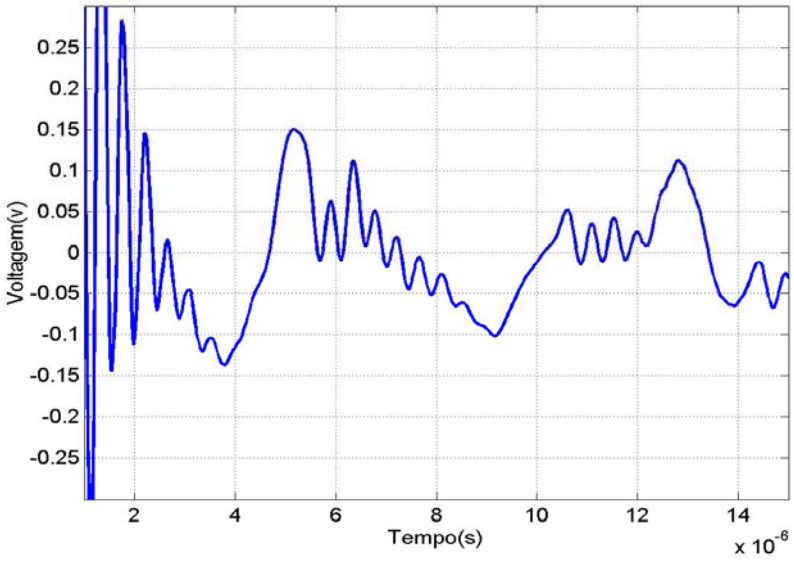


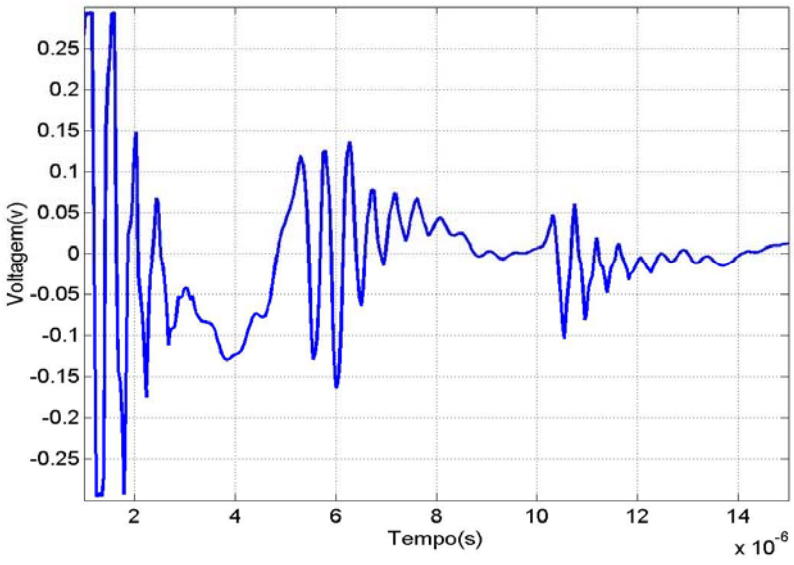
Figura 5.39. Resultado experimental dos ecos gerados por uma peça de alumínio com defeito e 32,1 mm de espessura em acoplamento direto para o transdutor de 2,25 MHz.

Foi realizado mais um teste experimental de pulso-eco com os transdutores de 2 e 2,25 MHz acoplados diretamente numa peça de alumínio cilíndrica de espessura 30,31 mm e com um defeito no eixo de diâmetro 1,5 mm e profundidade de 15 mm. Na fig.5.41 (a) apresentam-se os resultados para o transdudor fabricado de 2 MHz, o eco produzido pelo pequeno defeito aparece misturado com as vibrações de baixa freqüência do transdutor e torna-se difícil a identificação do mesmo. Já na fig.5.41 (b) os resultados do transdutor comercial de 2.25 MHz verificam a presença do eco a pouco mais de 5 μs. A amplitude do eco é muito pequena em relação à amplitude do

eco produzido pela parede posterior da peça, isso devido ao tamanho do defeito. Para esse teste não foi implementado nenhum modelo, pois o transdutor desenvolvido não apresenta a capacidade de ser bom receptor de ecos gerados por defeitos muito pequenos.

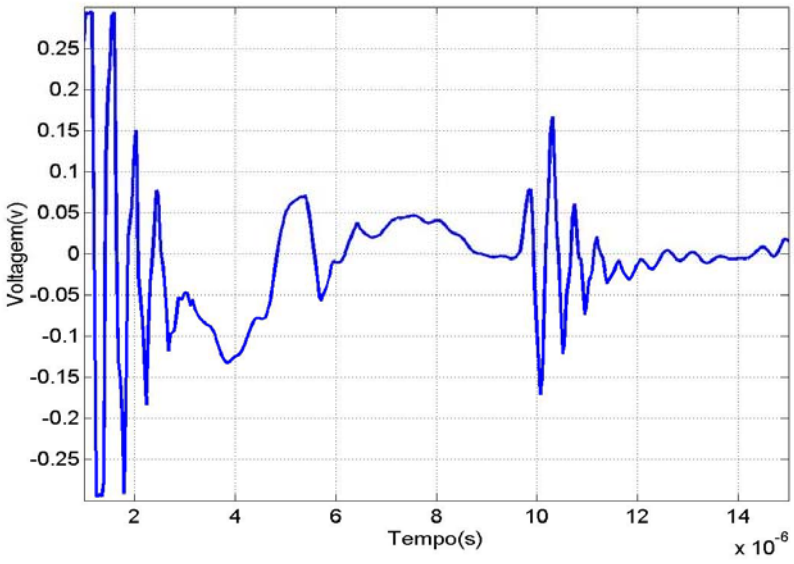


a)

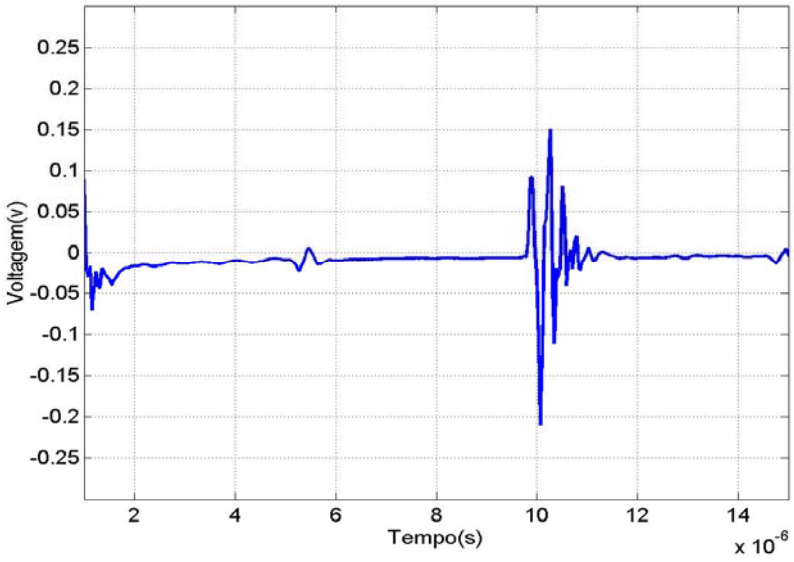


b)

Figura 5.40. Ecos gerados por uma peça de alumínio com defeito de 5 mm de diâmetro e 32,1 mm de espessura em acoplamento direto para o transdutor de 2 MHz a) modelo do ANSYS e b) resultado experimental.



a)



b)

Figura 5.41. Resultado experimental dos ecos gerados por uma peça de alumínio com defeito de 1,5mm de diâmetro e 30,31mm de espessura em acoplamento direto para a) transdutor de 2MHz e b) transdutor de 2,25MHz.

6. CONCLUSÕES E OBSERVAÇÕES

A modelagem de transdutores piezelétricos de ultra-som utilizando o MEF é capaz de fornecer boa descrição física do comportamento dos mesmos, em diferentes condições de funcionamento, desde que as propriedades dos materiais que compõem o transdutor sejam definidas com exatidão. As constantes elásticas, piezelétricas e dielétricas e o coeficiente de amortecimento são parâmetros decisivos do material piezelétrico que afetam diretamente a resposta vibracional do transdutor. O material usado para a camada de retaguarda do transdutor tem grande importância na forma de onda de pressão emitida no meio de propagação. Um material da camada de retaguarda com maior grau de amortecimento melhora a resposta do transdutor de banda larga, e pode afetar na sensibilidade do transdutor. Verifica-se que se a fração volumétrica de Tungstênio na matriz de epóxi da camada de retaguarda diminui, o "ring" do pulso emitido é mais longo e a onda *head* tem maior amplitude criando maior interferência na onda de borda.

Os coeficientes de amortecimento dos materiais que compõem o transdutor têm uma influência muito importante nas características e comportamento vibracional dos transdutores. Assim precisa-se determinar com exatidão o valor desse coeficiente para cada componente do transdutor. Uma maneira para obter esse valor é utilizar simulações de MEF ajustando a atenuação da onda acústica dentro dos materiais não piezelétricos. No caso dos materiais piezelétricos esse coeficiente foi determinado com o ajuste da curva de impedância elétrica da cerâmica nas simulações.

Outro ponto importante a ter-se em conta são os testes de convergência numérica, necessários para determinar as discretizações no tempo e no espaço e assim obter resultados mais exatos com os modelos. Foi determinado que para esse tipo de modelos a melhor discretização no espaço é de 20 elementos por comprimento de onda e no tempo de 1/20 do período para o incremento do tempo, de acordo com as sugestões apresentadas nos manuais do ANSYS.

A determinação das condições de contorno dos modelos influencia diretamente nos resultados, pois precisa-se simular as condições reais do meio onde o transdutor atua. Assim, para modelos que incluem meios líquidos acoplados a meios

sólidos precisa-se utilizar condições de contorno de interface fluido/estrutura.

A comparação dos resultados para propagação da onda de ultra-som em água, obtidos com o MEF e com o modelo do pistão plano mostram boa aproximação. Verifica-se que os resultados dos elementos finitos apresentam um modelo numérico mais realístico que pode descrever melhor o comportamento de um transdutor real. Na simulação de MEF, as ondas plana e de borda são mostradas como as obtidas no modelo do pistão plano, mas outra onda aparece deformando a onda de borda. Esta discrepância entre os modelos é causada pela existência das ondas *head*. A forma desta onda depende das propriedades do material utilizado na camada de retaguarda. Na comparação entre os dados experimentais e o resultado do MEF observa-se também boa aproximação e a presença da onda *head* é confirmada. Estes resultados confirmam a necessidade de modelos que expliquem melhor o comportamento da onda de ultra-som se propagando em água. O MEF é uma ferramenta poderosa que pode se utilizar no desenvolvimento desses modelos.

Os resultados obtidos das simulações do transdutor piezelétrico para a transmissão da onda acústica em meios líquidos ficaram bem próximos aos resultados experimentais feitos com o transdutor desenvolvido em laboratório. Verificou-se a presença das ondas *head* na onda que se propaga em meios líquidos e sólidos.

A mudança do sinal utilizado para excitar a cerâmica piezelétrica influencia na forma de onda gerada pelo transdutor dentro do meio de propagação. Os resultados obtidos com o modelo do transdutor implementado com MEF para propagação da onda em meios líquidos e sólidos apresentam boa concordância com a literatura. O modelo do transdutor desenvolvido tem boas características de recepção de sinais acústicos.

Assim, as simulações de pulso-eco mostram-se que os modelos desenvolvidos apresentam um comportamento muito parecido ao comportamento físico real dos testes feitos no laboratorio. Os resultados de pulso-eco apresentados neste trabalho foram de testes realizados com peças de alumínio com e sem defeitos. Verifica-se a necessidade de materiais piezelétricos com maior valor de coeficiente de amortecimento e baixo coeficiente de acoplamento eletromecânico radial para a

construção de transdutores de ENDUS. Devido a que nesse tipo de testes o sinal gerado tem que amortecer muito rápido e não devem aparecer modos de vibração laterais de baixas freqüências na cerâmica que poluam o sinal.

Mostra-se também nesses resultados que a aproximação da peça ao transdutor influi no sinal recebido do eco, pois em quanto mais próxima esteja a peça do transdutor as reflexões do primeiro eco produzido atrapalham o segundo eco proveniente da peça. Assim, precisa-se tomar em conta essa distância para poder obter resultados de boa qualidade.

Foram também desenvolvidos testes com peças de aço, porém, os resultados são de baixa amplitude já que esse material apresenta uma impedância acústica muito maior que da água e do transdutor desenvolvido. Essa característica cria baixa transmissão da onda gerando um eco com amplitude muito baixa, que fica misturada com o “ring” do transdutor desenvolvido e as vibrações de baixa freqüência dificultando a visualização no resultado.

De forma geral os resultados obtidos de modelos e simulações implementadas com o MEF para transdutores de ultra-som em aplicações de ensaios não destrutivos têm boa aproximação com os resultados experimentais. Assim, pode-se afirmar que a correta modelagem do transdutor e a definição precisa das propriedades dos materiais, produzem simulações do transdutor com resultados muito próximos aos experimentais.

7. TRABALHOS FUTUROS

Segundo os resultados obtidos neste trabalho e verificando a boa aproximação de modelos de transdutores de ENDUS com elementos finitos verifica-se a possibilidade de se estender a metodologia para simulação de defeitos tipo alvéolos provocados por corrosão. Podem também ser desenvolvidos modelos para testes de peças utilizando a metodologia de pulso-eco, tendo a possibilidade de gerar bancos de dados de diferentes tipos de defeitos dentro de peças de distintos materiais, e até criar os conhecidos diagramas DGS. Esses diagramas representam uma das técnicas tradicionalmente empregadas para determinar o tamanho de defeitos em ENDUS de pulso-eco. Esse método originalmente proposto por Krautkramer (KRAUTKRÄMER et al, 1990) utiliza uma família de curvas que descrevem a amplitude dos ecos como função do ganho, distância ao transdutor e tamanho do defeito. Essas curvas são obtidas com defeitos de vários tamanhos e com forma de cilindros colocados no eixo do campo acústico irradiado. Utilizando essas curvas, na prática, é possível determinar o tamanho de refletores equivalentes, que produzem a mesma amplitude do eco. Para melhorar o tempo de processamento com o MEF podem se utilizar algumas outras técnicas. Assim, existem trabalhos onde utilizam algoritmos que combinam modelos analíticos com MEF (LERCH et al, 1994).

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. (ADAMOWSKI et al, 1994) Adamowski, J.C. , Silva, E.C.N., Simon, C. , Buiochi, F. , Higuti, R.T.; *Finite Element Modeling of an Ultrasonic Capacitive Transducer*, IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, vol.1, p. 1261-1264, 1994.

2. (ADAMOWSKI et al, 1997) Adamowski, J.C., Matuda, M.Y., Buiochi, F., Furukawa, C.M., *Modelagem de Transdutores Piezelétricos de Potência*, Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, São Paulo, CD-ROM, 1997.

3. (ANSI, 1996) ANSI/IEEE. Publication and proposed revision of ANSI/IEEE standard 176-1987 *ANSI/IEEE standard on piezoelectricity*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v.43, n.5, p.717-72, set. 1996.

4. (ASSAAD et al, 1996) Assaad J. ,Ravez M., Brunnel C., Rouvaen J. Haine F.; *Influence of the thickness and the attenuation coefficient of backing on the response of transducers*, Ultrasonics, Vol 34, pp. 103-106, 1996.

5. (ASM, 1992) ASM HANDBOOK; *Ultrasonic Inspection*, Nondestructive Evaluation and Quality Control, vol. 17, p.232-277, 1992.

6. (BABOUX et al, 1992a) Baboux, J.C., Djelouah, H.; *Transient Ultrasonic Field by a Circular Transducer in Solid Medium* , The Journal of the Acoustical Society of America., vol. 92, no. 5, p.2932-2941, 1992.

7. (BABOUX et al, 1992b) Baboux, J.C. Kazys R. ; *Analysis of the transient ultrasonic fields radiated in solids by circular and annular sources*, The Journal of the Acoustical Society of America., vol. 92, no. 5, p.2942-2951, 1992.

8. (BAR-COHEN et al, 1984) Bar-Cohen Y. Stubbs D. Hoppe W., *Multiphase backing materials for piezoelectric broadband transducers.* The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 5, p.1629-1633, 1984.

9. (BATHE, 1996) Bathe J., K.; *Finite Element Procedures*, Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1996.

10. (BERLINCOURT, 1964) Berlincourt, D.A.; Curran, D.R.; Jaffe, H. *Piezoelectric and piezomagnetic materials, in: physical acoustics.* Academic Press, W.P. Mason, p.169-270, 1964.

11. (BUIOCHI et al, 1998) Buiochi, F., Adamowski, J.C., Matuda, M.Y., *Aplicacion del Método de Los Elementos Finitos en el Modelado de un Transductor Ultrasónico Capacitivo*, Revista Internacional Informacion Tecnologica, vol. 9, no. 4, p. 305-311, Chile, 1998.

12. (CASE et al, 1996) Case, T.J., Waag, R.C., *Flaw Identification from Time and Frequency Features of Ultrasonic Waveforms*, IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol.43, no.4, p.592-600, 1996.

13. (DATTA et al, 1996) Datta, D. Kishore, N. N. Munshi P.; *Features of Ultrasonic NDT to Identify Defects in Composite Materials Modelled by FEM* , Trends in NDE Science & Thecnology; 14th World Conference on Non-Destructive Testing, New Delhi, Vol. 4, p. 2139-2144, 1996.

14. (FRANCO et al, 2005) Franco E., Brizzoti M.A., San Miguel J.E., Buochi F., Adamowski J., *Determination of the acoustic properties of tungsten/epoxy and tungsten/polyurethane composites using ultrasonic transmissions technique*, Proceedings of COBEM 2005, 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 2005.

15. (GALLEGO, 1989) Gallego Juarez J *A; Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers*, Journal of Physics E. Sci. Intrusm. 22, p. 804-816, 1989.

16. (HAYMAN et al, 1979) Hayman, A.J., Weight, J.P., *Transmission and Reception of Short Ultrasonic Pulses by Circular and Square Transducers*, J. Acoust. Soc. Am., vol.66, no.4, p.945-951, 1979.

17. (ILAN et al, 1990) Ilan A. Weight P.; *The propagation of short pulses of ultrasound from a circular source coupled to an isotropic solid*, The Journal of the Acoustical Society of America., vol. 88, no. 2, p.1142-1151, 1990.

18. (KINO, 2000) Kino, G. S.; *Acoustic Waves: Devices, Imaging and Analog Signal Processing* , Richard Woods, 2000.

19. (KINSLER, 2000) Kinsler, L.E. Austin, R.F.; *Fundamentals of Acoustics* , 4th ed, New York, Wiley, 2000.

20. (KRAUTKRÄMER et al, 1990) Krautkrämer, J. Krautkrämer, H.; *Ultrasonic Testing of Materials* , 4th ed., Springer-Verlag, Berlin, 1990.

21. (LERCH, 1990) Lerch R. *Simulation of piezoelectric Devices by two- and Three-Dimensional Finite Elements*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 37, No. 2 pp 233-247, 1990.

22. (LERCH et al, 1994) Lerch, R., Landes H., Kaarmann T. *Finite Element Modeling of the pulse-eco behavior of ultrasound transducers*, 1994 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, pp.1021-1025, 1994.

23. (LIU et al, 1995) Liu M., Gorman D.G. ; *Formulation of rayleigh daming and its extensions* , Computers and Structures, vol. 57, no. 2, p.227-285, 1995.

24. (LOUPAS et al, 1995) Loupas T., Powers J., Gill R.; *An axial Velocity estimator for Ultrasound Blood Flow Imaging, Based on a Full evaluation of the Doppler Equation by means of a Two-dimensioanl Autocorrelatio Approach*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 42, no. 4, p.672-688, 1995.

25. (LUDWIG et al, 1988) Ludwig, R. Lord, W.; *Finite Element Formulation for the Study of Ultrasonic NDT Systems* , IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 35, no. 6, p.809-820, 1988.

26. (MARTHA et al, 1990) Martha G., Gururaja T., Shrout T., Newhman R., *Acoustic Properties of Particle/Polymer Composites for Ultrasonic Transducers Backing Applications*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 37, no. 6, p.506-513, 1990.

27. (MCLAREN et al, 1987) Mc Laren S. Weight J., *Transmit-receive mode responses from finite-sized targets in fluid media*, The Journal of the Acoustical Society of America. 86 Vol. 5 pp. 2102-2112, 1987.

28. (NADER, 2002) Nader, G., "*Desenvolvimento de técnicas de caracterzação de transdutores piezelétricos*",Tese de doutorado, Escola Politécnica - USP, p.13-61, São Paulo, 2002.

29. (NAILLON, 1983) Naillon, M., Coursant, R. H. And Besnier, F., "*Analysis of piezoelectric structures by a finite element method"*, Acta Electronica, 25, 4: p.341-362, 1983.

30. (OSTERGAARD et al, 1986) Ostergaard, D.F., Pawlak, T.P., *"Three-Dimensional Finite Element for Analyzing Piezoelectric Structures"*, Swanson Analysis Sustem, Inc., *IEEE, Proceedings of Ultrasonics Symposium*, p. 639 – 644, Houston, EUA, 1986.

31. (PIRANDA et al, 2001) Piranda, B., Ballandras S., Steichen W., Hecart B. *"A Model-Updating Procedure to Simulate Piezoelectric Transducers Accurately"*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 48, No. 5 p 1321-1331, 2001.

32. (PONS et al, 2004) Pons, J., Rodriguez H., Rocon, E., Fernandez, J., Villegas, M. *"Practical considerations of shear strain correction factor and Rayleigh damping in models of piezoelectric transducers"*, Sensors and Actuators A115, p 202-208, 2004.

33. (SAYERS et al, 1984) Sayers C. Tait C.; *Ultrasonic properties of transducer backings*, Ultrasonics, March 1884 p. 57-60, 1984.

34. (SILVA et al, 1993a) Silva, E.C.N., *Modelagem Vibracional de Transdutores de Ultra-Som Piezoelétricos pelo Método de Elementos Finitos*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 1993.

35. (SILVA et al, 1993b) Silva, E.C.N., Adamowski, J.C., Simon, C. *Aplicações do Método de Elementos Finitos (MEF) na Análise de Transdutores Piezelétricos de Ultra-Som.*, Anais do XII COBEM Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, ABCM, Brasília, p.1233-1236, 1993.

36. (STEPANISHEN, 1971) Stepanishen, P. R., *Transient radiation from piston in an infinite planar baffle*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 49, p.1629-1638, 1971.

37. (STUCKY et al, 1998) Stucky, P., Lord, W., *Spurious Modes in Finite Element Models for Ultrasonic Waves in Fluid-Solid Systems*, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 17, p. 963-969, 1998.

38. (HIGUTI, 1994) Higuti, R. T. ; *Ensaios Não-Destrutivos por Ultra-som para Inspeção de Corrosão em Tubulações*, Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, 1994.

39. (HIGUTI, 2002) Higuti, R. T. , Adamowski, J.C.; *Ultrasonic Densitometer Using a Multiple reflection Technique*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 49, No. 9 p 1260-1268, 2002.

40. (WANG et al , 2001) Wang H., Ritter T. Cao W. Shung K.; *High frequency properties of passive materials for ultrasonic transducers*, IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Processing, Vol. 48, n. 1, p.78-84, 2001.

41. (WEIGHT et al, 1978) Weight J.P., Hayman A., *Observations of the propagation of very short ultrasonic pulses and their reflection by small targets*, Journal of the Acoustic Association of America. Vol.63, n. 2,p. 396-404, 1978.

42. (WEIGHT, 1984) Weight J.P. ; *Ultrasonic beam structures in fluid media*, The Journal of the Acoustical Society of America., vol. 76, no. 4, p.1184-1191, 1984.

43. (WEIGHT, 1987) Weight J.P. ; *A model for the propagation of short pulses of ultrasound in a solid*, The Journal of the Acoustical Society of America., vol. 81, no. 4, p.815-826, 1987.

44. (WEIGHT, 1993) Weight J.P., *A model to predict the ultrasonic echo responses of small targets in solids*, The Journal of the Acoustical Society of America., vol. 94, no. 1, p.514-526, 1993.

45. (WU, 1996) Wu J, *Determination of velocity and attenuation of shear waves using ultrasonic spectroscopy*, The Journal of the Acoustical Society of America. 99 - 5. pp. 2871-2875, 1996.

ANEXOS

ANEXO1

Arquivo de Propriedades dos elementos e dos materiais para ANSYS

```
! Código para materiais utilizados no software ANSYS
!Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
/FILNAME,tran2bb
/PREP7
!--------------- Element Type  (Tipo de elemento)-----------------------------
!------------------Element 1
!* Material piezeletrico com estrutura axi-simetrica
!* PLANE13, 7 = DOF:X,Y,VOLT, 1 = exclude extra shapes, 1 = axisymetric
ET,1,PLANE13,7,1,1
!------------------Element 2
!* Material solido com estrutura axi-simetrica
!* PLANE42, 0 = paralel to global, 1 = suppress extra displacement,1 = axisymetric
ET,2,PLANE42, ,1,1      ! structural axisymetric
!------------------Element 3
!* Material fluido com estrutura -
!* usado como superficie de amortecimento de propagacao
!* de ondas acusticas.
!* FLUID29, 0 = structure present at interface, 1 = axisymetric
ET,3,FLUID29
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,3,3,1
!------------------Element 4
!* Material fluido sem estrutura
!* meio no qual a onda acustica se propaga.
!* FLUID29, 1 = No structure at interface, 1 = axisymetric
ET,4,FLUID29
KEYOPT,4,2,1
KEYOPT,4,3,1
!------------------Element 5
!* Material solido com estrutura axi-simetrica
!*Isotropico-necesita todas as propriedades do material
ET,5,PLANE42
KEYOPT,5,1,0
KEYOPT,5,2,0
KEYOPT,5,3,1
KEYOPT,5,5,0
KEYOPT,5,6,0
!---------------- Material Properties -------------
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!------------------ Material 1 - Agua
UIMP,1,DENS, , ,998, ! densidade
UIMP,1,MU, , ,1.0, !coeficiente de atrito
```

```
UIMP,1,SONC, , ,1500, !velocidade do som na água
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!------------------ Material 3 - Resina Epoxi - ARALDITE
UIMP,3,EX, , , 5.5163e9,
UIMP,3,DENS, , ,1.096151333e3,
UIMP,3,PRXY, , ,0.3447,
MP,DAMP,3,2.33e-8
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!------------------ Material 5 - Piez - PZT5A grupo de simetria 6 mm
!*** piezo constants
d31=-175E-12
d33=400E-12
d15=590E-12
TB,PIEZ,5, , ,1, ,    !*     PZT5A - classe de simetria 6mm
TBDATA,1,0,d31,0      !*   | 0   -175e-12   0  |       | 0  d31  0 |
TBDATA,4,0,d33,0      !*   | 0    400e-12   0  |       | 0  d33  0 |
TBDATA,7,0,d31,0      !*   | 0   -175e-12   0  |       | 0  d31  0 |
TBDATA,10,d15,0,0     !*   | 590e-12  0     0  |  =    |d15  0   0 |
TBDATA,13,0,0,d15     !*   | 0     0   590e-12 |       | 0   0  d15|
                      !*   | 0     0        0  |       | 0   0   0 |
!*** Elastic constants at E cst
c11=12.1E10
c12=7.54E10
c13=7.52E10
c33=11.1E10
c44=2.11E10
c66=2.26E10
TB,ANEL,5                  !*     PZT5A - classe de simetria 6mm (*10^10)
TBDATA,1,c11,c13,c12,0,0,0 !*   | 12.5 7.52 7.54   0   0   0   |  | c11 c13 c12  0   0   0
|
TBDATA,7,c33,c13,0,0,0     !*   |      11.1 7.52   0   0   0   |  |     c33 c13  0   0   0 |
TBDATA,12,c11,0,0,0        !*   |           12.5   0   0   0   |  |         c11  0   0   0 |
TBDATA,16,c44,0,0          !*   |                2.11  0   0   |= |             c44  0   0 |
TBDATA,19,c44,0            !*   |                    2.11 0    |  |                 c44  0 |
TBDATA,21,c66              !*   |                         2.26|  |                     c66|
!* Constantes dieletricas a strain (S) constante.
e00=8.85E-12
eps1=916*8.85E-12
eps3=830*8.85E-12          !*    PZT5A - classe de simetria 6mm  (*10^-9)
MP,PERX,5,eps1             !*    | 8.1066  0     0    |    | eps11  0    0   |
MP,PERY,5,eps3             !*    |  0   7.3455  0     | =  |   0  eps33  0   |
MP,PERZ,5,eps1             !*    |  0    0    8.1066 |    |  0    0  eps11 |
!*  Densidade e amortecimento
MP,DENS,5,7650
!QM=75
!FR=47000
!OMEGA=2*3.1416*FR
!BETA=1/(OMEGA*QM)
```

```
!MP,DAMP,5,BETA
MP,DAMP,5,5.3e-10
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!------------------ Material 10 - aço
UIMP,10,EX, , ,2.65e11, !Modulo de elasticidade
UIMP,10,DENS, , ,7.89e3,  !Densidade
UIMP,10,PRXY, , ,0.2991,   !Coeficiente de Poisson
MP,DAMP,10,10e-8         !Amortecimento
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!---------------- Material 14 - Lead Metaniobate - Axi simetrico
!*** permittivity at S cst (pola in y direction)
MP,PERX,14,356  ! 3.147E-9
MP,PERY,14,258  ! 2.28E-9
MP,PERZ,14,356  ! 3.147e-9
!*** piezo constants
e31=-.893
e33=6.83
e51=6.16
TB,PIEZ,14                     ! hexag 6mm sym assumed
TBDATA,1,0,e31,0
TBDATA,4,0,e33,0
TBDATA,7,0,e31,0
TBDATA,10,e51,0,0
TBDATA,13,0,0,e51
!*** Elastic constants at E cst
c11=14.9E10
c12=5.11E10
c13=4.91E10
c33=13.2E10
c44=4.53E10
TB,ANEL,14               ! hexag 6mm sym assumed
TBDATA,1,c11,c13,c12,0
TBDATA,7,c33,c13,0,0,0,c11
TBDATA,16,c44
!*** Densidade e Amortecimento
MP,DENS,14,7900
MP,DAMP,14,3e-8
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!------------------ Material 18 - aço sem amortecimento
!sem perdas
!para modelar propagacao em solidos
UIMP,18,EX, , ,21.0e10,
UIMP,18,DENS, , ,7.8e3,
UIMP,18,ALPX, , , ,
UIMP,18,REFT, , , ,
UIMP,18,NUXY, , , ,
UIMP,18,PRXY, , ,0.3,
UIMP,18,GXY, , , ,
```

```
UIMP,18,MU, , , ,
UIMP,18,DAMP, , , ,
UIMP,18,KXX, , , ,
UIMP,18,C, , , ,
UIMP,18,ENTH, , , ,
UIMP,18,HF, , , ,
UIMP,18,EMIS, , , ,
UIMP,18,QRATE, , , ,
UIMP,18,MURX, , , ,
UIMP,18,MGXX, , , ,
UIMP,18,RSVX, , , ,
UIMP,18,PERX, , , ,
UIMP,18,VISC, , , ,
UIMP,18,SONC, , , ,
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!------------------ Material 19 - Aluminio sem amortecimento
!UIMP,19,EX, , ,6.87e10,
!UIMP,19,DENS, , ,2.8e3,
!UIMP,19,ALPX, , , ,
!UIMP,19,REFT, , , ,
!UIMP,19,NUXY, , ,0.34,
!UIMP,19,PRXY, , , ,
!UIMP,19,GXY, , ,2.56e10,
!UIMP,19,MU, , , ,
!UIMP,19,DAMP, , , ,
!UIMP,19,KXX, , , ,
!UIMP,19,C, , , ,
!UIMP,19,ENTH, , , ,
!UIMP,19,HF, , , ,
!UIMP,19,EMIS, , , ,
!UIMP,19,QRATE, , , ,
!UIMP,19,MURX, , , ,
!UIMP,19,MGXX, , , ,
!UIMP,19,RSVX, , , ,
!UIMP,19,PERX, , , ,
!UIMP,19,VISC, , , ,
!UIMP,19,SONC, , , ,
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!------------------ Material 21 - Agua (pulso eco)
UIMP,21,EX, , , ,
UIMP,21,DENS, , ,998,
UIMP,21,ALPX, , , ,
UIMP,21,REFT, , , ,
UIMP,21,NUXY, , , ,
UIMP,21,PRXY, , , ,
UIMP,21,GXY, , , ,
UIMP,21,MU, , , ,
UIMP,21,DAMP, , , ,
```

```
UIMP,21,KXX, , , ,
UIMP,21,C, , , ,
UIMP,21,ENTH, , , ,
UIMP,21,HF, , , ,
UIMP,21,EMIS, , , ,
UIMP,21,QRATE, , , ,
UIMP,21,MURX, , , ,
UIMP,21,MGXX, , , ,
UIMP,21,RSVX, , , ,
UIMP,21,PERX, , , ,
UIMP,21,VISC, , , ,
UIMP,21,SONC, , ,1500,
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!------------------ Material 24 - Nylon
!UIMP,24,EX, , , 7.58e9,
!UIMP,24,DENS, , ,1.120e3,
!UIMP,24,PRXY, , ,0.391,
!MP,DAMP,24,2.5e-10,
UIMP,24,EX, , , 7.4499e9,
UIMP,24,DENS, , ,1.405612767e3,
UIMP,24,PRXY, , ,0.27587,
MP,DAMP,24,5e-9,
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!------------------ Material 25 - Resina Epoxi + tugnstenio (frac. vol. 25.7%)
UIMP,25,EX, , , 1.0513e10,
UIMP,25,DENS, , ,5.766147e3,
UIMP,25,PRXY, , ,0.343431,
MP,DAMP,25,1.555e-8,
```

ANEXO2

Programa em MATLAB para reproduzir o modelo de Sayers (SAYERS et al, 1984)

```
%Marco Aurelio Brizzoti e Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
clear all;
close all;
global delta
%araldite
dens1=1087.141;
vt1=1040.7;
vl1=2195.7;
%tungstenio
%dens2=18700;
dens2=19400;
vt2=2860;
vl2=5233;
%delta=.8;
omega=1;
K1=omega/vt1;
K2=omega/vt2;
```

```
k1=omega/vl1;
k2=omega/vl2;
mi1=(vt1^2)*dens1;
mi2=(vt2^2)*dens2;
ii=1;
for delta=0:.01:.5;
%for delta=0:.005:.5;
   %delta=0.25
   %densidade
   dens(ii)=dens1*(1-delta) + dens2*delta;
   mi=fzero(@f,1e10);
   Kdivkquad=(1/3)*(3*(mi1/mi)*(K1/k1)^2                    -4*((mi1/mi)-
1))*(3*(mi2/mi)*(K2/k2)^2   -4*((mi2/mi)-1))/((3*(mi2/mi)*(K2/k2)^2   -4*((mi2/mi)-
1))...
   +delta*(3*(mi1/mi)*(K1/k1)^2 -3*(mi2/mi)*(K2/k2)^2 -4*((mi1/mi) -(mi2/mi))));
   vt(ii)=sqrt(mi/dens(ii));
   vl(ii)=sqrt(Kdivkquad).*vt(ii);
   ii=ii+1;
end
for delta=.51:.01:1;
%for delta=.51:.005:1.5;
   %delta=0.25
   %densidade
   dens(ii)=dens1*(1-delta) + dens2*delta;
   mi=fzero(@f,1e11);
   Kdivkquad=(1/3)*(3*(mi1/mi)*(K1/k1)^2                    -4*((mi1/mi)-
1))*(3*(mi2/mi)*(K2/k2)^2   -4*((mi2/mi)-1))/((3*(mi2/mi)*(K2/k2)^2   -4*((mi2/mi)-
1))...
   +delta*(3*(mi1/mi)*(K1/k1)^2 -3*(mi2/mi)*(K2/k2)^2 -4*((mi1/mi) -(mi2/mi))));
   vt(ii)=sqrt(mi/dens(ii));
   vl(ii)=sqrt(Kdivkquad).*vt(ii);
   ii=ii+1;
end

de=[1179.724;
    …];
v=[2142.7;
   ...];
fv=[0.552320854;
   ...];
z=[de(1)*v(1);
  ...];
fracvol=0:.01:1;
%fracvol=0:.005:1;
figure(1)
plot(fracvol*100,vl);
hold on
plot(fracvol*100,vt,'m');
```

```
plot(fv,v,'r +');
%plot(fv,v,'r');
xlabel('Fracao de Volumen de Tungstenio (%)');
ylabel('Velocidade Longitudinal (m/s)');
grid
legend('V. Long. teorica','V. Trans. teorica','V. Long. Experimental' );
figure(2)
zl=dens.*vl;
zt=dens.*vt;
hold on
plot(fracvol*100,zl);
plot(fracvol*100,zt,'m');
plot(fv,z,'r +');
xlabel('Fracao de Volumen de Tungstenio (%)');
ylabel('Impedancia Acustica (Rayl)');
grid
legend('Z Long. teorica','Z Trans. teorica','Z Long. Experimental' );
figure(3)
plot(fracvol*100,dens);
hold on
plot(fv,de,'r +');
xlabel('Fracao de Volumen de Tungstenio (%)');
ylabel('Densidade (kg/m3)');
grid
legend('Densidade teorica','Densidade Experimental' );
```

ANEXO3

Programa de MATLAB para o calculo das atenuações

```
%Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
clear all;
close all;
%constantes
den_agua=[997.630;
          ...
          997.6767];
vel_agua =[1490;
           ...
          1489.5];
Vol_agua=[64.380;
          ...
          166.6599];
Vol_amostra=[28.550;
             ...
             4.8792];
esp_amostra=[13.923e-3;
             ...
             19.265e-3];
vel_amostra=[2142.7;
```

```
                ...
                1347.9];
den_amostra=[1179.724
                ...;
                5923.643];
for i=1:19;
dens_agua=den_agua(i,1); %densidade da agua em kg/m3
dens_amostra=den_amostra(i,1); %densidade da amostra em Kg/m^3
c_agua = vel_agua(i,1); %velocidade de propagacao longitudinal da agua em m/s(20,6 graus C)
d_amostra = esp_amostra(i,1); %espessura da amostra em m
Vpp_agua=Vol_agua(i,1);
Vpp_amostra=Vol_amostra(i,1);
%velocidade de propagacao longitudinal da amostra
c_amostra=vel_amostra(i,1);
%coeficientes de transmissao
Z_amostra(i,1)=c_amostra*dens_amostra;
Z_agua(i,1)=c_agua*dens_agua;
T_agua_amostra(i,1)=2*Z_amostra(i,1)/(Z_amostra(i,1)+Z_agua(i,1));
T_amostra_agua(i,1)=2*Z_agua(i,1)/(Z_amostra(i,1)+Z_agua(i,1));
T_total(i,1)=(4*Z_agua(i,1)*Z_amostra(i,1))/((Z_agua(i,1)+Z_amostra(i,1))^2);
%atenuacao
atenuacao_amostra(i,1)=20*log10((Vpp_agua/Vpp_amostra)*T_total(i,1))/(d_amostra*100); %dB/cm;
end
i=i+1;
atenuacao_amostra
fv=[0.552320854;
    ...
   26.80820853];
figure(5);
plot(fv,atenuacao_amostra(:,1),'+');
grid
xlabel('Fracao Volumetrica de tungstenio (%)');
ylabel('Atenuacao Acustica (dB/cm)');
```

ANEXO4

Programa de MATLAB para o calculo das amplitudes no domínio da freqüência para os sinais das amostras

```
%Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
trigger1=0;
trigger2=0;
freq=1/4.000000000E-09
n1=length(agua03); %sem amostra----------------------------------------
t1=trigger1:1/freq:trigger1 + (n1-1)/freq;
n2=length(a03); %com amostra-------------------------------------------
t2=trigger2:1/freq:trigger2 + (n2-1)/freq;
figure(1)
```

```
plot(t1,agua03);%sem amostra----------------------------------------
xlabel('tempo')
ylabel('amplitude')
grid
hold on
plot(t2,a03,'r'); %com amostra----------------------------------------
legend('Sinal sem a amostra','Sinal com a amostra');
for i=1:5009;
   g(i,1)=0;
   i=i+1;
end
fft_sinal1=fft([agua03 g]);%sem amostra----------------------------------
fft_sinal1=fft_sinal1(1:floor(length(fft_sinal1)/2));
freq1=linspace(0,freq/2,floor(length(fft_sinal1)));
fft_sinal2=fft([a03 g]);%com amostra----------------------------------------
fft_sinal2=fft_sinal2(1:floor(length(fft_sinal2)/2));
freq2=linspace(0,freq/2,floor(length(fft_sinal2)));
absfft_sinal1=abs(fft_sinal1);
absfft_sinal2=abs(fft_sinal2);
figure(3)
plot(freq1,absfft_sinal1)
hold on
plot(freq2,absfft_sinal2,'r')
xlabel('Frequencia')
ylabel('Amplitude')
legend('Sinal sem a amostra','Sinal com a amostra');
grid
```

ANEXO5

Programa que gera o sinal de senos para a excitação das amostras

```
%Gera um sinal para deslocamento em amostras
%Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
clear all;
close all;
freq=input('Ingresse a Frequencia Central do Transdutor (Hz):');
dist=input('Ingresse a discreticacao no tempo (20 por default):');
tfinal=%input('Ingresse o tempo de propagacao em microsegundos:');
n_ciclos=input('Ingresse o numero de ciclos da onda :');
FID = fopen('deslocamento.txt','w');
fprintf(FID,'ANTYPE,4 \n');
fprintf(FID,'TRNOPT,FULL \n');
fprintf(FID,'LUMPM,0 \n');
fprintf(FID,'NLGEOM,0 \n');
fprintf(FID,'SSTIF,0 \n');
fprintf(FID,'NROPT,AUTO, , \n');
fprintf(FID,'EQSLV,FRONT,1e-008 ,0, \n\n');
i=1;
for tempo=(1/freq)/dist:(1/freq)/dist:(n_ciclos/freq)
```

```
   fprintf(FID,'FLST,2,11,1,ORDE,4 \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento
   fprintf(FID,'FITEM,2,1 \n'); % primeiro no da izquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,2 \n'); %ultimo no da filha a direita
   fprintf(FID,'FITEM,2,3 \n'); % segundo no da izquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,-11 \n'); %penultimo no da filha a direita
   %fprintf(FID,'SF,P51X,PRES,%d, \n',10e-12*sin(2*pi*freq*tempo));
   fprintf(FID,'D,P51X, ,%d, , , ,UY \n',10e-12*sin(2*pi*freq*tempo));
   fprintf(FID,'FLST,2,501,1,ORDE,4 \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento em x = 0 a izquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,1 \n'); % primeiro no de embaixo
   fprintf(FID,'FITEM,2,512 \n'); % Primeiro no de acima
   fprintf(FID,'FITEM,2,522\n'); %segundo no de acima
   fprintf(FID,'FITEM,2,-1020 \n'); % segundo no da embaixo
   fprintf(FID,'D,P51X, ,0, , , ,UX \n');
   fprintf(FID,'FLST,2,501,1,ORDE,4 \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento em X = 0 a direita
   fprintf(FID,'FITEM,2,2 \n'); % primeiro no de embaixo
   fprintf(FID,'FITEM,2,12 \n'); % Primeiro no de acima
   fprintf(FID,'FITEM,2,13 \n'); %segundo no de embaixo
   fprintf(FID,'FITEM,2,-511 \n'); % segundo no de Acima
   fprintf(FID,'D,P51X, ,0, , , ,UX \n');
   fprintf(FID,'TIME, %d  \n',tempo);
   fprintf(FID,'AUTOTS,0 \n');
   fprintf(FID,'NSUBST,2,0,0,0 \n');
   fprintf(FID,'KBC,0 \n');
   fprintf(FID,'LSWRITE, %1.1d, \n \n',i);
   sinal(i)=10e-12*sin(2*pi*freq*tempo);
   t(i)=tempo;
   i=i+1;
end
figure(1);
plot(t,sinal);
grid;
hold;
for tempo1 =((n_ciclos/freq)+(1/freq)/dist):(1/freq)/dist:tfinal/freq
   fprintf(FID,'FLST,2,11,1,ORDE,4 \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento
   fprintf(FID,'FITEM,2,1 \n'); % primeiro no da izquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,2 \n'); %ultimo no da filha a direita
   fprintf(FID,'FITEM,2,3 \n'); % segundo no da izquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,-11 \n'); %penultimo no da filha a direita
    fprintf(FID,'D,P51X, ,%d, , , ,UY \n',0);
   fprintf(FID,'FLST,2,501,1,ORDE,4 \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento em x = 0 a izquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,1 \n'); % primeiro no de embaixo
   fprintf(FID,'FITEM,2,512 \n'); % Primeiro no de acima
   fprintf(FID,'FITEM,2,522\n'); %segundo no de acima
```

```
   fprintf(FID,'FITEM,2,-1020 \n'); % segundo no da embaixo
   fprintf(FID,'D,P51X, ,0, , , ,UX \n');
   fprintf(FID,'FLST,2,501,1,ORDE,4  \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento em X = 0 a direita
   fprintf(FID,'FITEM,2,2 \n'); % primeiro no e embaixo
   fprintf(FID,'FITEM,2,12 \n'); % Primeiro no de acima
   fprintf(FID,'FITEM,2,13 \n'); %segundo no de embaixo
   fprintf(FID,'FITEM,2,-511 \n'); % segundo no da acima
   fprintf(FID,'D,P51X, ,0, , , ,UX \n');
   fprintf(FID,'TIME, %d  \n',tempo1);
   fprintf(FID,'AUTOTS,0\n');
   fprintf(FID,'NSUBST,2,0,0,0\n'); %numero de substeps
   fprintf(FID,'KBC,0\n');
   fprintf(FID,'LSWRITE, %1.1d, \n \n',i);
   sinal1(i)=0;
   t1(i)=tempo1;
   plot(t1,sinal1);
   i=i+1;
end
fprintf(FID,'OUTRES,ALL,NONE \n');
fprintf(FID,'OUTRES,NSOL,ALL  \n\n');
fclose(FID);
```

ANEXO6

Programa que gera o deslocamento para simular o pistão plano no ANSYS

```
%Gera a Funcao de deslocamento para analise transiente
%Mudar Numero dos nos
%Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
clear all;
close all;
freq=2e6; %input('Ingresse a Frequencia Central do Transdutor (Hz):');
dist=20; %input('Ingresse a discreticacao no tempo (20 por default):');
tfinal=10; %input('Ingresse o tempo de propagacao em microsegundos(10 por
default):');
FID = fopen('deslocamento.txt','w');
fprintf(FID,'ANTYPE,4 \n');
fprintf(FID,'TRNOPT,FULL \n');
fprintf(FID,'LUMPM,0 \n');
fprintf(FID,'NLGEOM,0 \n');
fprintf(FID,'SSTIF,0 \n');
fprintf(FID,'NROPT,AUTO, , \n');
fprintf(FID,'EQSLV,FRONT,1e-008 ,0, \n\n');
fprintf(FID,'TINTP, ,0.25,0.5,0.5,0.5,0.2 \n\n');
i=1;
for tempo=(1/freq)/dist:(1/freq)/dist:(1/freq)
   fprintf(FID,'FLST,2,170,1,ORDE,3  \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento
   fprintf(FID,'FITEM,2,1 \n'); % primeiro no da izquerda
```

```
   fprintf(FID,'FITEM,2,3 \n'); % segundo no da izquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,-171 \n'); %ultimo no da filha a direita
   fprintf(FID,'D,P51X,   ,%d,   ,   ,   ,UY   \n',10e-12+10e-12*(sin(2*pi*freq*tempo-
pi/2)));
   fprintf(FID,'TIME, %d  \n',tempo);
   fprintf(FID,'AUTOTS,0 \n');
   fprintf(FID,'NSUBST,1,0,0,0 \n');
   fprintf(FID,'KBC,0 \n');
   fprintf(FID,'LSWRITE, %1.1d, \n \n',i);
   sinal(i)=10e-12+10e-12*(sin(2*pi*freq*tempo-pi/2));
   t(i)=tempo;
   i=i+1;
end
figure(2);
plot(t,sinal);
grid;
xlabel('Tempo(s)');
ylabel('Amplitude');
hold;
g=i;
for tempo1 =((1/freq)+(1/freq)/dist):(1/freq)/dist:tfinal*1e-6
   fprintf(FID,'TIME, %d  \n',tempo1);
   fprintf(FID,'AUTOTS,0\n');
   fprintf(FID,'NSUBST,1,0,0,0\n'); %numero de substeps
   fprintf(FID,'KBC,0\n');
   fprintf(FID,'LSWRITE, %1.1d, \n \n',g);
   sinal1(g)=0;
   t1(g)=tempo1;
   plot(t1,sinal1);
   g=g+1;
end
%fprintf(FID,'OUTRES,ALL,NONE \n');
%fprintf(FID,'OUTRES,NSOL,ALL  \n\n');
fclose(FID);
```

ANEXO7

Programa para simular a resposta impulsiva do pistão plano

```
%Resposta Impulsiva para Pistão Plano.
%Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
clear all;
% x - distância axial(mm)
% y - distância radial (mm)
% r - raio do transdutor (mm)
% c - velocidade de propagação no meio (1500 m/s = 1500000mm/s)
% t - tempo (s)
% f - freqüência (MHz)
% omega - ângulo omega
% potvel - potencial de velocidade
```

```
x=input('Digite a distância axial "x" (mm): ');
y=input('Digite a distância radial "y" (mm): ');
r=input('Digite o raio do transdutor (mm): ');
f=input('Digite a freqüência (MHz): ');
c=1500e3; %velocidade de propagação no  meio
f=f*1e6;
dt=1/(20*f);
%Cálculo de Omega%
t0=x/c;
t1=sqrt( (r-y).^2 + x.^2 )/c;
t2=sqrt( (r+y).^2 + x.^2 )/c;
t0r=round(t0/dt);
t1r=round(t1/dt);
t2r=round(t2/dt);
taux=[t1+dt:dt:t2];
l1=length(taux);
omega3 =  zeros(1,40);
if (y==0),
        omega1 = pi.*ones(1,t1r-t0r+1);
        omega=[omega3 omega1 omega3];
        elseif ( (y>0) & (y<r) ),
        omega1 = pi.*ones(1,t1r-t0r+1);
        omega2 = acos( ( (c.*taux).^2 - x.^2 + y.^2 -r.^2 )./...
                ( 2.*y.*sqrt((c.*taux).^2 - x.^2) ) );
        omega = [omega3 omega1 omega2 omega3];
elseif (y==r),
        omega(1) = pi/2;
        omega1 = acos( sqrt( (c.*taux).^2 - x.^2)/(2.*r) );
        omega = [omega3 omega omega1 omega3];
elseif (y>r),
        omega(1:t1r-t0r+1) = zeros(1,t1r-t0r+1);
        omega1 = acos( ( (c.*taux).^2 - x.^2 + y.^2 - r.^2)./...
                (2.*y.*sqrt((c.*taux).^2 - x.^2)) );
        omega = [omega3 omega omega1 omega3];
end;
%Potencial de Velocidade
t= t0-dt*40: dt :t0-dt*40+ length(omega)*dt-dt;
figure(1);
plot(t,omega);
pres=gradient(omega);
grid;
title('Potencial de Velocidade')
xlabel('tempo em segundos')
%Pressão Impulsiva
figure(2);
t= t0-dt*40: dt :t0-dt*40+ length(pres)*dt-dt;
plot(t,pres);
grid;
```

```
title('Pressão Impulsiva')
xlabel('tempo em segundos')
%Convolução
amp=sin(0:dt*f*(2*pi):2*pi);        %amplitude da onda senoidal
pp=conv(amp,pres);        %pressão no ponto
t= t0-dt*40: dt :t0-dt*40+ length(pp)*dt-dt;
figure(3);
plot(t,real(pp));
grid;
title('Pressão no Ponto')
xlabel('tempo em segundos')
```

ANEXO8

Programa que gera a pressão para simular o pistão plano no ANSYS

```
%Programa para gerar a função de pressão na simulação de pistão plano no ANSYS
%Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
clear all;
close all;
freq= input('Ingresse a Freqüência Central da Cerâmica (Hz):');
dist= input('Ingresse a discretização no tempo:');
tfinal= input('Ingresse o tempo de propagação em microssegundos:');
FID = fopen('Pressao1.txt','w');
fprintf(FID,'ANTYPE,4 \n');
fprintf(FID,'TRNOPT,FULL \n');
fprintf(FID,'LUMPM,0 \n');
fprintf(FID,'NLGEOM,0 \n');
fprintf(FID,'SSTIF,0 \n');
fprintf(FID,'NROPT,AUTO, , \n');
fprintf(FID,'EQSLV,FRONT,1e-008,0, \n\n');
i=1;
for tempo=(1/freq)/dist:(1/freq)/dist:(1/freq)
   fprintf(FID,'FLST,2,43,1,ORDE,3 \n'); %num de nos onde se aplica a Pressão
   fprintf(FID,'FITEM,2,1 \n'); % primeiro no da esquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,3 \n'); % segundo no da esquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,-44 \n'); %ultimo no da filha a direita
   fprintf(FID,'SF,P51X,PRES,%d\n',(sin(2*pi*freq*tempo)-
(1/2)*sin(2*(2*pi*freq*tempo))));%curva
  fprintf(FID,'FLST,2,150,1,ORDE,4 \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento em x = 0
   fprintf(FID,'FITEM,2,1 \n'); % primeiro no de embaixo
   fprintf(FID,'FITEM,2,257 \n'); % Primeiro no de acima
   fprintf(FID,'FITEM,2,363\n'); %segundo no de acima
   fprintf(FID,'FITEM,2,-510 \n'); % segundo no da embaixo
   fprintf(FID,'D,P51X, ,0, , , ,UX \n');
   fprintf(FID,'FLST,2,107,1,ORDE,4 \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento em y = 0
   fprintf(FID,'FITEM,2,257 \n'); % primeiro no da esquerdo
   fprintf(FID,'FITEM,2,108 \n'); % Primeiro no de direita
```

```
   fprintf(FID,'FITEM,2,258 \n'); %segundo no de direita
   fprintf(FID,'FITEM,2,-362 \n'); % segundo no da esquerda
   fprintf(FID,'D,P51X, ,0, , , ,UY \n');
   fprintf(FID,'TIME, %d  \n',tempo);
   fprintf(FID,'AUTOTS,0 \n');
   fprintf(FID,'NSUBST,2,0,0,0 \n');
   fprintf(FID,'KBC,0 \n');
   fprintf(FID,'LSWRITE, %1.1d, \n \n',i);
   sinal(i)=(sin(2*pi*freq*tempo)-(1/2)*sin(2*(2*pi*freq*tempo)));
   i=i+1;
end
for tempo =((1/freq)+(1/freq)/dist):(1/freq)/dist:tfinal/freq
   fprintf(FID,'FLST,2,43,1,ORDE,3 \n'); %num de nos onde se aplica a Pressão
   fprintf(FID,'FITEM,2,1 \n'); % primeiro no da esquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,3 \n'); % segundo no da esquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,-44 \n'); %ultimo no da filha a direita
   fprintf(FID,'SF,P51X,PRES,%d, \n',0);% curva
   fprintf(FID,'FLST,2,150,1,ORDE,4  \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento em x = 0
   fprintf(FID,'FITEM,2,1 \n'); % primeiro no de embaixo
   fprintf(FID,'FITEM,2,257 \n'); % Primeiro no de acima
   fprintf(FID,'FITEM,2,363 \n'); %segundo no de acima
   fprintf(FID,'FITEM,2,-510 \n'); % segundo no da embaixo
   fprintf(FID,'D,P51X, ,0, , , ,UX \n');
   fprintf(FID,'FLST,2,107,1,ORDE,4  \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento em y = 0
   fprintf(FID,'FITEM,2,257 \n'); % primeiro no da esquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,108 \n'); % Primeiro no de direita
   fprintf(FID,'FITEM,2,258 \n'); %segundo no de direita
   fprintf(FID,'FITEM,2,-362 \n'); % segundo no da esquerda
   fprintf(FID,'D,P51X, ,0, , , ,UY \n');
   fprintf(FID,'TIME, %d  \n',tempo);
   fprintf(FID,'AUTOTS,0\n');
   fprintf(FID,'NSUBST,2,0,0,0\n');
   fprintf(FID,'KBC,0\n');
   fprintf(FID,'LSWRITE, %1.1d, \n \n',i);
   i=i+1;
end
fclose(FID);
plot(sinal);
grid;
```

ANEXO9

Programa que gera o sinal de voltagem para analise transiente de propagação

```
% Gera un arquivo de tempo-voltagem para o analise transiente no ANSYS
% Propgacao da onda
%Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
clear all
```

```
close all
salida=input('Arquivo de saida (*.txt):  ','s');
fid=fopen(salida,'w');
Nv= input('Ingresse o numero do no ativo = ','s');
No= input('Ingresse o numero do no em terra =','s');
f=input('Defina frequencia do sinal [Hz] = ');
distemp=input('Defina a discretizacao no tempo (20 por default)= ');
t=1/f;
tinter=t/distemp;
step=input('Defina numero de passos = ');
%tf=input('defina tempo final [s] = ');
%tinter=input('defina discretizacao do tempo (intervalo) [s] = ');
t=(tinter:tinter:step*tinter)';
%t=input('entre o vetor de tempo = ');
s1=input('Ingresse o numero de senos (sinal) = ');
x=1:20;
a=(sin(2*pi*x/20))';
if s1 == 1/2
   a=a([1:1:10]);
else
for i=1:(s1-1)
   b=[a];
   a=[a;(sin(2*pi*x/20))'];
end
end
A=size(a);
B=size(t);
C=B(:,1)-A(:,1);
x=(zeros(1,C))';
v=[a;x];
%v=input('entre o vetor da funcao periodica = ');
fprintf(fid,'%s\n' ,'/SOLU');
fprintf(fid,'%s\n' ,'ANTYPE,4');
fprintf(fid,'%s\n' ,'TINTP, ,0.25,0.5,0.5,0.5,0.2');
fprintf(fid,'%s\n' ,'FLST,2,1,1,ORDE,1');
basura=strcat('FITEM,2,',No);
fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
basura=strcat('D,',No,',VOLT,0');
fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
fprintf(fid,'%s\n' ,'TIMINT,1,STRUCT');
fprintf(fid,'%s\n' ,'TIMINT,1,ELECT');
fprintf(fid,'%s\n' ,'TIMINT,1,FLUID'); %
for i=1:length(t)
   Numero=num2str(v(i));
   tiempo=num2str(t(i));
   fprintf(fid,'%s\n' ,'FLST,2,1,1,ORDE,1');
   basura=strcat('FITEM,2,',Nv);
   fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
```

```
   basura=strcat('D,',Nv,',VOLT,',Numero,',');
   fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
   basura=strcat('TIME,',tiempo);
   fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
   fprintf(fid,'%s\n' ,'AUTOTS,0');
   fprintf(fid,'%s\n' ,'NSUBST,1,0,0,0 ');
   fprintf(fid,'%s\n' ,'KBC,1');
   NdeLS=num2str(i);
   basura=strcat('LSWRITE,',NdeLS,',');
   fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
   fprintf(fid,'%s\n'
,'!*************************************************************');
end
fprintf(fid,'OUTRES,ALL,NONE \n');
fprintf(fid,'OUTRES,NSOL,ALL  \n\n');
fclose(fid);
plot(t,v);
xlabel('tempo (s)','fontsize',20);
ylabel('amplitude (V)','fontsize',20);
grid
```

ANEXO10

Programa para gerar o deslocamento na simulação de recepção do transdutor

```
%Gera a Funcao de deslocamento para analise transiente
%Mudar Numero dos nos
%Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
clear all;
close all;
freq=2e6; %input('Ingresse a Frequencia Central do Transdutor (Hz):');
dist=20; %input('Ingresse a discreticacao no tempo (20 por default):');
tfinal=2; %input('Ingresse o tempo de propagacao em microsegundos(10 por
default):');
FID = fopen('recepcao.txt','w');
fprintf(FID,'ANTYPE,4 \n');
fprintf(FID,'TRNOPT,FULL \n');
fprintf(FID,'LUMPM,0 \n');
fprintf(FID,'NLGEOM,0 \n');
fprintf(FID,'SSTIF,0 \n');
fprintf(FID,'NROPT,AUTO, , \n');
fprintf(FID,'EQSLV,FRONT,1e-008 ,0, \n\n');
fprintf(FID,'TINTP, ,0.25,0.5,0.5,0.5,0.2 \n\n');
fprintf(FID,'FLST,2,1,1,ORDE,1 \n');
fprintf(FID,'FITEM,2,21196 \n'); % No a terra da ceramica
fprintf(FID,'D,21196,VOLT,0 \n\n');  % No a terra da ceramica
i=1;
for tempo=(1/freq)/dist:(1/freq)/dist:(1/freq)
   fprintf(FID,'FLST,2,22,1,ORDE,3 \n'); %num de nos onde se aplica o
deslocamento
```

```
   fprintf(FID,'FITEM,2,55556 \n'); % primeiro no da izquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,55557 \n'); % segundo no da izquerda
   fprintf(FID,'FITEM,2,-55577 \n'); %ultimo no da filha a direita
   %fprintf(FID,'D,P51X, ,%d, , , ,UY \n',10e-12*(sin(2*pi*freq*tempo)-
(1/2)*sin(2*(2*pi*freq*tempo))));
   fprintf(FID,'D,P51X, ,%d, , , ,UY \n',-10e-12+10e-12*(-sin(2*pi*freq*tempo-
pi/2))); %(sinal negativo)
   fprintf(FID,'TIME, %d  \n',tempo);
   fprintf(FID,'AUTOTS,0 \n');
   fprintf(FID,'NSUBST,1,0,0,0 \n');
   fprintf(FID,'KBC,0 \n');
   fprintf(FID,'LSWRITE, %1.1d, \n \n',i);
   sinal(i)=-10e-12+10e-12*(-sin(2*pi*freq*tempo-pi/2)); %(sinal negativo)
   t(i)=tempo;
   i=i+1;
end
figure(2);
plot(t,sinal);
grid;
hold;
g=i;
for tempo1 =((1/freq)+(1/freq)/dist):(1/freq)/dist:tfinal*1e-6
   fprintf(FID,'TIME, %d  \n',tempo1);
   fprintf(FID,'AUTOTS,0\n');
   fprintf(FID,'NSUBST,1,0,0,0\n'); %numero de substeps
   fprintf(FID,'KBC,0\n');
   fprintf(FID,'LSWRITE, %1.1d, \n \n',g);
   sinal1(g)=0;
   t1(g)=tempo1;
   plot(t1,sinal1);
   g=g+1;
end
fprintf(FID,'OUTRES,ALL,NONE \n');
fprintf(FID,'OUTRES,NSOL,ALL  \n\n');

fclose(FID);
```

ANEXO11

Programa que gera o sinal de voltagem para analise transiente de pulso-eco

```
%Gera um arquivo de tempo-voltagem para o analise transiente pulso-eco no
%ANSYS
%Jimmy E. San Miguel Medina – EPUSP 2005
clear all
close all
salida=input('Arquivo de saida (*.txt):  ','s');
fid=fopen(salida,'w');
Nv= input('Ingresse o numero do no ativo = ','s');
No= input('Ingresse o numero do no em terra =','s');
f=input('Defina frequencia do transdutor [Hz] = ');
```

```
p=1/f; %periodo
tinter=p/20; %discretizacao no tempo
tfinal=input('Defina o tempo de propagacao =');
sinal_1=[2.5e-8    -20
   5e-8        -200
   7.5e-8       -140
   1e-7        -110
   1.25e-7      -90
   1.5e-7      -69
   1.75e-7      -50
   2e-7        -45
   2.25e-7      -40
   2.5e-7      -32
   2.75e-7      -28
   3e-7        -22
   3.25e-7      -19
   3.5e-7      -16
   3.75e-7      -14
   4e-7        -10
   4.25e-7      -8
   4.5e-7      -5
   4.75e-7      -2
   5e-7         0];
t_1=sinal_1(:,1);
v_1=sinal_1(:,2);
tinicial=(max(t_1)+(tinter));
t=(tinicial+tinter:tinter:tfinal);
fprintf(fid,'%s\n' ,'ANTYPE,4');
fprintf(fid,'%s\n' ,'TRNOPT,FULL');
fprintf(fid,'%s\n' ,'LUMPM,0');
fprintf(fid,'%s\n' ,'NLGEOM,0');
%fprintf(fid,'%s\n' ,'NLGEOM,1');
fprintf(fid,'%s\n' ,'SSTIF,0');
fprintf(fid,'%s\n' ,'NROPT,AUTO, ,');
fprintf(fid,'%s\n' ,'PRECISION,0 ');
fprintf(fid,'%s\n' ,'MSAVE,0  ');
fprintf(fid,'%s\n' ,'TOFFST,0, ');
fprintf(fid,'%s\n' ,'TIMINT,1,STRUCT');
fprintf(fid,'%s\n' ,'TIMINT,1,ELECT');
fprintf(fid,'%s\n' ,'TIMINT,1,FLUID');
fprintf(fid,'%s\n' ,'TINTP, ,0.25,0.5,0.5, ,');
fprintf(fid,'%s\n'
,'!*************************************************************');
fprintf(fid,'%s\n' ,'FLST,2,1,1,ORDE,1');
basura=strcat('FITEM,2,',No);
fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
basura=strcat('D,',No,',VOLT,0');
fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
```

```
for i=1:20;
      Numero=num2str(v_1(i));
      tiempo=num2str(t_1(i));
      fprintf(fid,'%s\n' ,'FLST,2,1,1,ORDE,1');
      basura=strcat('FITEM,2,',Nv);
      fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
      basura=strcat('D,',Nv,',VOLT,',Numero,',');
      fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
      basura=strcat('TIME,',tiempo);
      fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
      fprintf(fid,'%s\n' ,'AUTOTS,0');
      fprintf(fid,'%s\n' ,'NSUBST,1,0,0,0 ');
      fprintf(fid,'%s\n' ,'KBC,0');
      NdeLS=num2str(i);
      basura=strcat('LSWRITE,',NdeLS,',');
      fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
      fprintf(fid,'%s\n'
,'!*************************************************************');
end
i=21;
      Numero=0;
      tiempo=num2str(tinicial);
      basura=strcat('DDELE,',Nv,',VOLT,');
      fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
      basura=strcat('TIME,',tiempo);
      fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
      fprintf(fid,'%s\n' ,'AUTOTS,0');
      fprintf(fid,'%s\n' ,'NSUBST,1,0,0,0 ');
      fprintf(fid,'%s\n' ,'KBC,0');
      NdeLS=num2str(i);
      basura=strcat('LSWRITE,',NdeLS,',');
      fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
      fprintf(fid,'%s\n'
,'!*************************************************************');

for   i=22:(length(t)+21);
    k=i-21;
    tiempo=num2str(t(k));
    basura=strcat('TIME,',tiempo);
    fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
    fprintf(fid,'%s\n' ,'AUTOTS,0');
    fprintf(fid,'%s\n' ,'NSUBST,1,0,0,0 ');
    fprintf(fid,'%s\n' ,'KBC,0');
    NdeLS=num2str(i);
    basura=strcat('LSWRITE,',NdeLS,',');
    fprintf(fid,'%s\n' ,basura);
    fprintf(fid,'%s\n'
,'!*************************************************************');
```

```
end
fprintf(fid,'OUTRES,ALL,NONE \n');
fprintf(fid,'OUTRES,NSOL,ALL  \n\n');
fclose(fid);
demas=0;
plot(t_1,v_1,'--');
grid
hold
plot(t,demas,'--');
```

ANEXO 12

Programa para calcular a forma de onda de ultra-som se propagando em solidos.

```
%function [u,tscale1] = ecorespjim(a,y,x)
a=12.7;
y=0;
x=8;
f=1e6;          %frequency
%       function [u,tscale1] = echoresp(a,y,x,s)
%
%       MODEL FOR SOLIDS
%
%  Julio Cezar Adamowski - 20-10-1999
%
%       circular transducer (source/receiver) of radius a
%       small target in the field at a distance x on the axis of the transducer
%       and at a distance y from the axis
%       source velocity s
%
%       a -> radius of the circular transducer (mm)
%       y -> distance from the axis (mm)
%       x -> distance in the axis (mm)
%       s -> source velocity (sampled at dt)
%
%       calls function pot2 which calculates the velocity potencial impulse response
clf
close all;
global t0r t1r t2r; % posicions of plane and edge waves in the velocity potencial
a=a*1e-3;
y=y*1e-3;
x=x*1e-3;
cl= 5.943e3;  %6.2e3;          % sound velocity (longitudinal wave)
ct= 3.226e3;  %3.1e3;          % shear wave
ro=7.8e3;     %2800;    %density
```

```
aa=2;           %mode conversion constant
bb=1.5;                 %mode conversion constant
dt=20e-9;       %sample time
tl=x/cl;        %longitudinal wave
n=1;            %number of cicles of sinusoidal wave
dt=1/f/20;
% montion of the source
s=-sine(f,dt,n); %(n cicles of sinusoidal waves of frequency f)
%n=40; %centre frequency = 1/(n*dt), dt=20e-9 and n=20, f=2.5MHz
%s=pressure(n);
% Calculates the velocity potencial impulse response for the longitudinal wave
omega_aux1=zeros(1,100);
[omega_aux2]=pot2(x,y,a,cl,dt);
omega = [omega_aux1 omega_aux2];
l=length(omega);
omega(l+1:ceil(1.5.*l))=zeros(1,ceil(0.5.*l));
elwp1=100+t1r-t0r;   %position of the first edge
theta1=asin(t0r/t1r);
  ml1=1-exp(-aa*theta1);        %mode conversion of longitudinal
  mt1=(bb*theta1*exp(1-bb*theta1))^2;     %and shear waves
if t1r == t2r
  ml2=1;
  mt2=1;
  theta2=theta1;
else
  theta2=asin(t0r/t2r);
    ml2=1-exp(-aa*theta2);
    mt2=(bb*theta2*exp(1-bb*theta2))^2;
  end;
    elwp2=100+t2r-t0r;
  poslong=t0r;

% Calculates the velocity potencial impulse response for the shear wave
omegat_aux1=zeros(1,100);
[omegat_aux2]=pot2(x,y,a,ct,dt);
omegat = [omegat_aux1 omegat_aux2];
lt=length(omegat);
omegat(lt+1:ceil(1.5.*lt))=zeros(1,ceil(0.5.*lt));
eswp1=100+t1r-t0r;
eswp2=100+t2r-t0r;
        posshear=t0r;
% Calculates the pressure impulse response for the longitudinal wave
lomega=length(omega);
shift2=[omega(3:lomega) 0 0];
difer=(shift2-omega)/2;
ul=difer;
difer(elwp1-2:elwp1+2)=ml1*difer(elwp1-2:elwp1+2);
difer(elwp2-2:elwp2+2)=ml2*difer(elwp2-2:elwp2+2);
```

```
ul(elwp1-2:elwp1+2)=sin(theta1)*difer(elwp1-2:elwp1+2);
ul(elwp2-2:elwp2+2)=sin(theta2)*difer(elwp2-2:elwp2+2);
% Calculates the pressure impulse response for the shear wave
ltomega=length(omegat);
shift2t=[omegat(3:ltomega) 0 0];
difert=(shift2t-omegat)/2;
ut=difert;
for i=98:102
   difert(i)=0;
   ut(i)=0;
end;
difert(eswp1-2:eswp1+2)=mt1*difert(eswp1-2:eswp1+2);
difert(eswp2-2:eswp2+2)=mt2*difert(eswp2-2:eswp2+2);
ut(eswp1-2:eswp1+2)=cos(theta1)*difert(eswp1-2:eswp1+2);
ut(eswp2-2:eswp2+2)=cos(theta2)*difert(eswp2-2:eswp2+2);
ll=length(difer);
dd=posshear-poslong;
difert_aux=zeros(1,dd-1);
difert=[difert_aux difert];
ut=[difert_aux ut];
difert=ro*ct*difert;
lt=length(difert);
difer(ll+1:lt)=zeros(1,(lt-ll));
difer=ro*cl*difer;
ul(ll+1:lt)=zeros(1,(lt-ll));
difer=difert+difer;
ui=ul+ut;
%Convolution of the source montion s with the pressure inpulse responce dsoma
p=conv(s,difer);
u=conv(s,ui);
lp=length(p);
ld=length(difer);
%adjust length of the impulse response vector
for i=ld+1:lp
   difer(i)=0;
   ui(i)=0;
end
%adjust time scale
ta=tl-98.*dt;
tb=ta + (lp-1).*dt;
tscale1=[ta:dt:tb];
tscale1=tscale1*1e6; %time scale in micro seconds
figure
subplot(2,1,1),
plot(tscale1,ui,'r'),grid;
%Put labels on the plot
 xlabel('time (us)');
 ylabel('impulse response');
```

```
subplot(2,1,2),
plot(tscale1,-real(u)),grid;
 xlabel('time (us)');
 ylabel('velocity');
 figure
 uuf=-real(u);
 plot(tscale1*1e-6,uuf/max(uuf)),grid;
 xlabel('Tempo(s)');
 ylabel('Amplitude');
 axis([1e-6 6e-6 -1 1])
```