

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA E DE
SISTEMAS MECÂNICOS**

*Nota final
8,3 (oitos e três)
[assinatura]*

**MODELAGEM E FABRICAÇÃO DE ARRAYS
LINEARES DE ULTRA-SOM**

Danilo Soares Benedito
Miguel Hiroto Tadano

São Paulo
2005

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA E DE
SISTEMAS MECÂNICOS**

**MODELAGEM E FABRICAÇÃO DE ARRAYS
LINEARES DE ULTRA-SOM**

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

Danilo Soares Benedito
Miguel Hiroto Tadano

Orientador: Prof. Dr. Flávio Buiochi

São Paulo

2005

Dedicatória

Às nossas famílias, pelo apoio durante toda a carreira acadêmica.

A todos os amigos pelo apoio, compreensão e companhia nos momentos difíceis.

Agradecimentos

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Flávio Buiochi, pela colaboração e por estar presente nos momentos em que precisamos durante esse projeto.

Aos alunos de pós-graduação, Marco Aurélio Brizzotti Andrade, que nos instruiu na parte de construção do protótipo e contribuiu na parte de simulação, e Jimmy Ernesto San Medina que também contribuiu na parte de simulação.

Aos técnicos do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), que disponibilizaram a máquina de corte.

Resumo

Este trabalho trata do projeto e fabricação de transdutores piezelétricos do tipo array linear, emitindo ondas ultra-sônicas na água na frequência entre 1 e 2 MHz. A função deste transdutor é detectar objetos refletores metálicos na água através da emissão e recepção de ondas ultra-sônicas, as quais são geradas pela excitação elétrica de um material piezelétrico. Para a etapa de modelagem numérica utiliza-se o software comercial de simulação ANSYS. Com esse modelo é possível simular a propagação de ondas acústicas geradas pelos transdutores através da utilização do método dos elementos finitos. Também é feita a modelagem analítica com a ajuda do software Matlab. Após a modelagem, construiu-se o transdutor de array linear, seguido de testes experimentais para detectar obstáculos em água por meio de imagens no modo B. Finalmente, os resultados teóricos obtidos na modelagem são comparados com os experimentais.

Abstract

This work deals with the development of linear array piezoelectric transducers, emitting 1-2 MHz ultrasonic waves in aluminum and water. The function of such transducers is to detect flaws in metallic parts through the emission and reception of ultrasonic waves, which are generated by the electric excitement of a piezoelectric material. For the stage of numerical modeling, the commercial simulation software ANSYS is used. This model is able to simulate the acoustic wave propagation generated by the transducers through the use of the finites elements method. Also the analytical modeling is made with the Matlab software. After modeling, the linear array transducer is built, followed by B-scan experimental tests to detect obstacles in water. Finally, the theoretical results gotten in the modeling are compared with the experimental results.

Lista de Figuras:

Figura 1.1 - Pulso – Eco.....	9
Figura 2.1 – Resolução axial.....	13
Figura 2.2 – Resolução lateral.....	13
Figura 2.3 - Transdutor monoelemento.....	14
Figura 2.4 – Array.....	15
Figura 2.5 – Vários tipos de arrays: a) Anéis, b) Linear, c) Retangular e d) Anéis segmentados.....	16
Figura 2.6 - Tipos de varredura: a) Varredura linear, b) Varredura setorial.....	16
Figura 2.7 – Profundidade de foco de um array.....	17
Figura 2.8 – Focalização de um array.....	18
Figura 2.9 – Cálculo da posição focal.....	19
Figura 2.10 – Focalização e deflexão.....	19
Figura 3.1 – Resposta em pressão sem focalização.....	23
Figura 3.2 – Excitação da cerâmica.....	24
Figura 3.3 – Modelo do array no ANSYS.....	24
Figura 3.4 - Propagação da onda sem focalização a) primeiro passo.....	25
Figura 3.5 – Cálculo do foco.....	26
Figura 3.6 – Excitação dos elementos do array com atrasos.....	27
Figura 3.7 – Resposta em pressão com focalização.....	28
Figura 3.8 - Propagação da onda com focalização.....	29
Figura 3.9 – Pontos a serem analisados.....	30
Figura 3.10 – Resposta em pressão sem focalização com excitação senoidal.....	30
Figura 3.11 – Resposta em pressão sem focalização com excitação senoidal (5 ciclos).....	31
Figura 3.12 - Propagação da onda sem focalização no tempo.....	32
Figura 3.13 – Resposta em pressão com focalização com excitação senoidal.....	32
Figura 3.14 - Resposta em pressão com focalização com excitação senoidal (5 ciclos).....	33
Figura 3.15 - Propagação da onda com focalização no tempo.....	34
Figura 4.1 - Soldagem da folha na cerâmica.....	36
Figura 4.2 – Molde.....	36

Figura 4.3 – a) Array com eletrodos, b) Terra.....	36
Figura 4.4 – Preenchimento dos cortes	37
Figura 4.5 – Fios soldados nos eletrodos	38
Figura 5.1 – Esquema para aquisição de dados	40
Figura 5.2 – a) Esquema para o primeiro experimento. b) Modo B com o sinal refletido. c) Com a envoltória do sinal retificado.	41
Figura 5.3 – a) Esquema para o segundo experimento. b) Modo B com o sinal refletido. c) Com a envoltória do sinal retificado.	42
Figura 5.4 – a) Esquema para o terceiro experimento. b) Modo B com o sinal refletido. c) Com a envoltória do sinal retificado.	44
Figura 5.5– a) Esquema para o quarto experimento. b) Modo B com o sinal refletido. c) Com a envoltória do sinal retificado.	45
Figura 5.6 – a) Esquema para o quinto experimento. b) Modo B com o sinal refletido. c) Com a envoltória do sinal retificado.	46
Figura 5.7 – Campo acústico à distância de 26,3 mm centralizado ao array	47

Sumário

1. Introdução	9
1.1. Introdução	9
1.2. Objetivos	9
1.3. Justificativa	10
2. Fundamentos Teóricos.....	11
2.1. Piezeletricidade	11
2.2. Transdutor Piezelétrico	12
2.2.1. Transdutor Monoelemento	13
2.2.2. Array	14
2.3. Focalização.....	18
2.4. Método dos Elementos Finitos.....	21
3. Modelagem	22
3.1. Modelagem Software ANSYS	22
3.1.1. Propagação Sem Focalização	23
3.1.2. Propagação Com Focalização.....	26
3.2. Modelagem no Software Matlab	29
3.2.1. Propagação Sem Focalização	30
3.2.2. Propagação Com Focalização.....	32
4. Construção do Array	34
4.1. Características Construtivas	34
4.2. Montagem	35
5. Procedimento Experimental e Resultados	39
6. Conclusões	48
Referências Bibliográficas	49

1. Introdução

1.1. Introdução

A inspeção por ultra-som é de extrema importância, pois pode prevenir a quebra de peças mecânicas que poderiam vir a causar acidentes em vários tipos de sistemas mecânicos. A técnica normalmente utilizada é a de pulso-eco que consiste na propagação de um pulso de ultra-som em um material e ao encontrar variações (interfaces, incrustações, defeitos, etc) parte deste pulso é refletido. O pulso refletido é captado pelo mesmo transdutor que foi utilizado para gerar o pulso, e passado a um equipamento que processa este sinal, apresentando-o em uma tela (fig. 1.1).

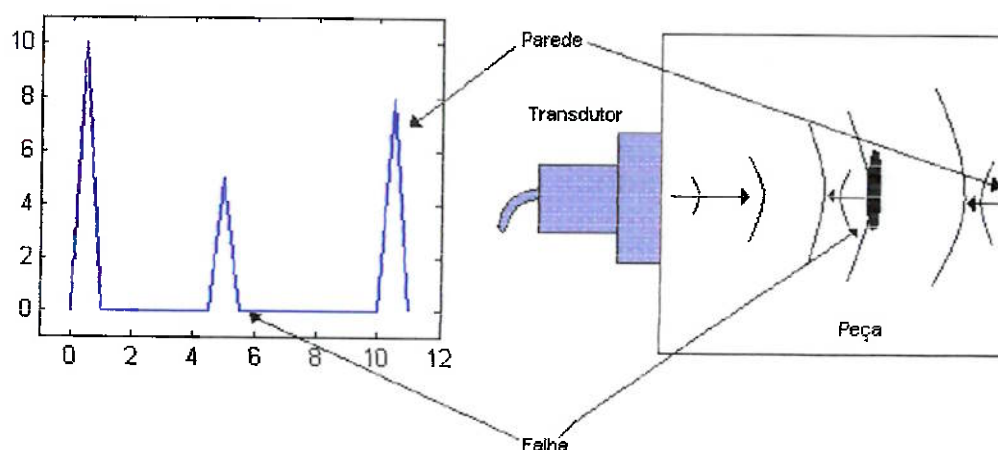


Figura 1.1 - Pulso – Eco

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo projetar e fabricar um array linear de ultra-som para aplicações em ensaios não destrutivos (END). As técnicas de END consistem em submeter a peça em estudo à ação de um campo ultra-sônico e verificar as variações deste campo. A partir destas variações, é possível avaliar a presença e as características dos defeitos.

Abordam-se conceitos relacionados à propagação de ondas de ultra-som e à análise vibracional do transdutor ultra-sônico e sua interação com o meio externo.

A análise teórica implementada neste trabalho envolve a determinação do campo acústico, com focalização e sem focalização e interferência de um elemento do array em outro elemento do mesmo array. São feitas análises numéricas pelo método dos elementos finitos (MEF), o qual permite obter resultados próximos à realidade.

1.3. Justificativa

Já na etapa de construção a adoção de técnicas se faz necessária para que não se perca um protótipo devido a falhas durante a construção tendo que ser descartado antes mesmo de seu teste.

Este trabalho tem como justificativa a análise de arrays lineares de ultra-som na utilização de detecção de refletores em água. O uso de um array possibilita a obtenção de resultados mais precisos e de melhor qualidade. Aumentando a resolução também possibilita um resultado mais rápido do que para um monoelemento. No Brasil ainda há poucas pesquisas na área de arrays de ultra-som. Neste projeto preocupa-se com a modelagem e a adoção de técnicas para a construção do protótipo representando um pequeno passo para a obtenção de transdutores com qualidade.

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Piezeletricidade

Piezeletricidade é uma propriedade linear que certos tipos de materiais apresentam, que provoca uma polarização elétrica do material quando o mesmo é sujeito a uma tensão mecânica, e a deformação do material quando o mesmo é exposto a um campo elétrico. O primeiro caso é chamado efeito piezelétrico direto e o segundo, efeito piezelétrico indireto (Silva, 1993).

Este efeito foi descoberto pelos físicos franceses Pierre e Jacques Curie em 1880. A razão física para a ocorrência do efeito piezelétrico pode ser explicada pelo fato dos materiais ativos consistirem de um grande número de dipolos elétricos. Uma voltagem elétrica aplicada através de uma placa de material realinha os dipolos, resultando em uma mudança na espessura da placa (Shung, 1996).

Os cristais piezelétricos que ocorrem na natureza, raramente são utilizados em transdutores devido a baixa qualidade de suas propriedades. Os materiais piezelétricos que estão sendo mais utilizados nas últimas décadas são PZT, PbTiO_3 , $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ e materiais compostos com estas cerâmicas. A propriedade piezelétrica bem caracterizada nos materiais produzidos artificialmente é conseguida através da polarização. A polarização de um material ferroelétrico é feita com o aquecimento até uma temperatura pouco acima de sua temperatura de Curie, em seguida o material é resfriado devagar na presença de um campo elétrico de alta intensidade, tipicamente da ordem de 20kV/cm, aplicado na direção em que se deseja o efeito piezelétrico. Esse campo elétrico normalmente é aplicado ao material através de eletrodos.

Considerando a tensão mecânica (T), a deformação (S), o deslocamento elétrico (D) e o campo elétrico (E), pode-se relacioná-las por meio de equações denominadas equações constitutivas da piezeletricidade:

Efeito Direto:

$$D = dT + \varepsilon^T E \qquad D = eS + \varepsilon^S E \qquad (16)$$

$$E = -gT + D/\epsilon^T \quad E = -hS + D/\epsilon^S \quad (17)$$

Efeito Inverso:

$$S = s^E T + dE \quad T = c^E S - eE \quad (18)$$

$$S = s^D T + gD \quad T = c^D S - hD \quad (19)$$

Onde c e s são constantes elásticas, d , e , g e h constantes piezelétricas e ϵ é constante dielétrica.

2.2. Transdutor Piezelétrico

Transdutores ultra-sônicos são usados em um grande número de aplicações no campo da biomedicina, no SONAR (Sound Navigation and Ranging), técnica de enviar ondas acústicas através da água para detecção de objetos submersos, além de ensaios não destrutivos (END). Neste trabalho será dada atenção ao campo de ensaios não destrutivos, visto que a função do array a ser projetado é verificar falhas em peças. Ao se analisar uma peça é interessante, além de se detectar a presença ou não de defeitos, poder avaliar parâmetros quantitativos como tamanho, forma, localização e orientação dos defeitos.

A resolução de um transdutor pode ser definida como a capacidade de distinguir duas falhas próximas. Caso duas falhas distintas estejam mais próximas que a resolução, elas serão identificadas como uma única falha. A resolução deve ser definida nas direções axial e lateral, sendo, geralmente, diferentes (Simon, 1993).

A resolução axial está relacionada com a duração dos pulsos ultra-sônicos emitidos pelo transdutor (fig. 2.1). Quanto maior a frequência do pulso, melhor é a resolução, porém a atenuação do sinal também aumenta. Então, é necessário fazer uma análise para se obter uma boa resolução e também um sinal com boa qualidade. A resolução axial pode ser definida da seguinte forma: $\Delta z \approx c/2f$ (1), onde f é a frequência da onda e c é a velocidade de propagação da onda no meio.

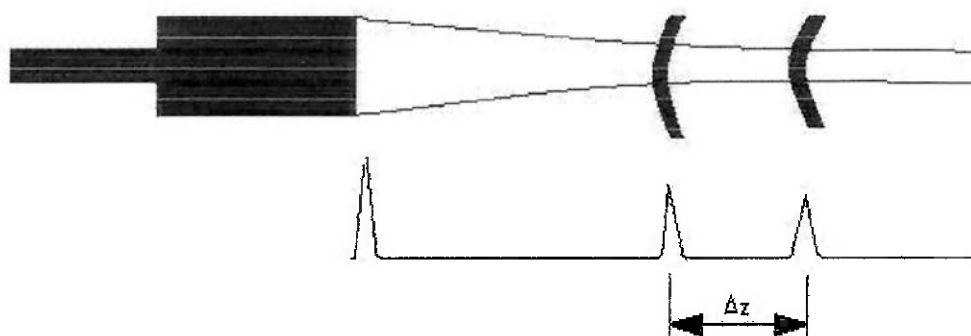


Figura 2.1 – Resolução axial

A resolução lateral depende do tamanho do transdutor (fig. 2.2), e quanto mais distante a falha estiver do transdutor, pior é a resolução, pois o diâmetro do feixe acústico aumenta com a distância.

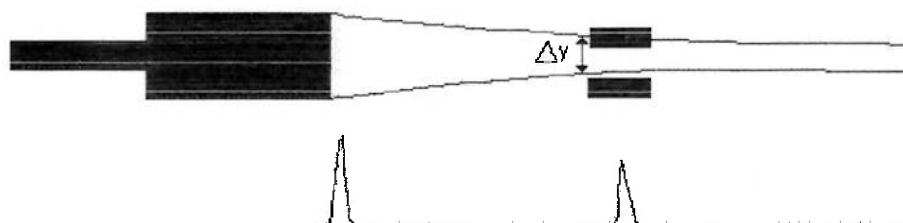


Figura 2.2 – Resolução lateral

2.2.1. Transdutor Monoelemento

Um transdutor ultra-sônico monoelemento é composto por uma cerâmica piezelétrica, um backing na parte posterior e, na parte anterior, encontra-se o meio de propagação da onda ultra-sônica, que é acoplada a cerâmica através do matching (fig. 2.3).

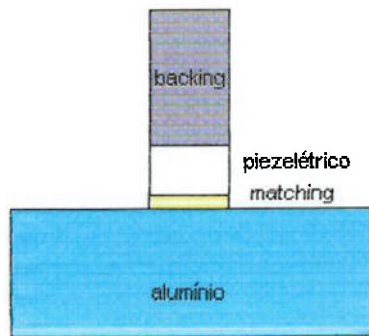


Figura 2.3 - Transdutor monoelemento

O backing atua como um amortecedor das vibrações do material piezelétrico, quando este é excitado por um pulso (elétrico ou mecânico). É composto por uma mistura epóxi-alumina ou epóxi-tungstênio.

O matching é destinado ao casamento da impedância do material piezelétrico com o meio externo, diminuindo a reflexão de onda nessa interface. Também é composto por epóxi-alumina ou epóxi-tungstênio.

Alguns dos conceitos importantes que são levados em consideração durante o projeto de um transdutor são definidos a seguir (Simon, 1993).

2.2.2. Array

Um array é um transdutor composto por alguns ou vários monoelementos (fig. 2.4). Com a utilização de arrays ultra-sônicos, é possível eliminar partes mecânicas móveis durante a inspeção de peças, pois o array é capaz de focalizar e defletir o feixe acústico sem a necessidade de deslocar o transdutor. Assim, com a utilização de arrays, evitam-se erros relacionados à dinâmica do sistema de inspeção (vibrações, por exemplo) e erros dimensionais dessas partes mecânicas. Impondo-se leis de atrasos na emissão dos pulsos ultra-sônicos em cada elemento do array, pode-se focalizar a energia acústica em diferentes pontos do espaço e, portanto, realizar a varredura na peça e obter uma imagem de uma região de interesse sem a necessidade de mover o transdutor.

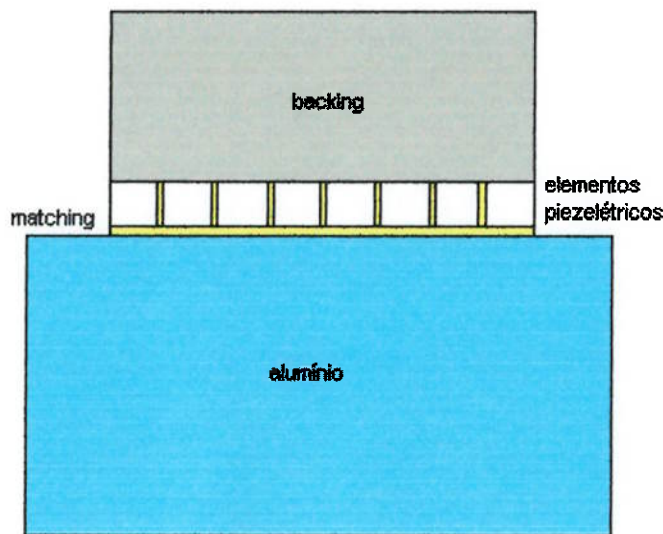


Figura 2.4 – Array

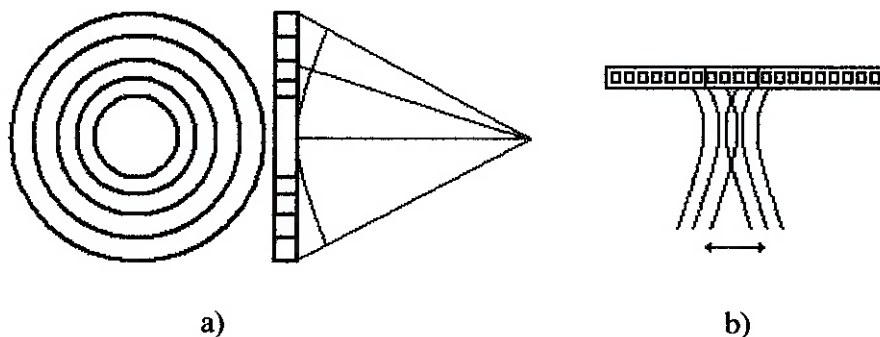
Os arrays podem ser de diferentes tipos:

Array de anéis (fig. 2.5a) – Este tipo de array é a um transdutor circular composto por anéis concêntricos.

Array linear (fig. 2.5b) – Este array foi mostrado anteriormente, é um transdutor composto por vários monoelementos dispostos lado a lado linearmente.

Array retangular (fig. 2.5c) – Neste tipo de array cada linha de elementos pode ser considerado como um array linear. Com esse array é possível varrer uma área e obter uma imagem em três dimensões dessa área.

Array de anéis segmentados (fig. 2.5d) – É parecido com o array de anéis, porém os anéis são compostos por vários monoelementos.



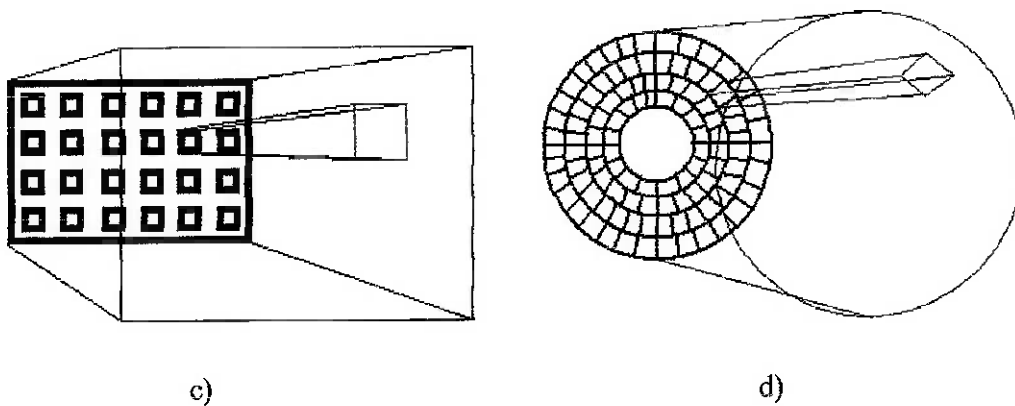


Figura 2.5 – Vários tipos de arrays: a) Anéis, b) Linear, c) Retangular e d) Anéis segmentados

Existem dois tipos de varredura, a linear e a setorial (Alvear *et al.*). Para se obter uma varredura linear (fig. 2.6a) basta selecionar um número de elementos para excitar e move-se o campo com uma simples comutação eletrônica. Dessa forma, é feito um movimento aparente do transdutor, excitando eletronicamente um grupo de elementos do array, e em seguida desligando o último do conjunto e ligando o seguinte ao primeiro, e assim consecutivamente. Essa varredura se aplica a um array com um grande número de elementos. A varredura setorial (fig. 2.6b) é obtida por meio da variação dos atrasos que se aplicam a cada elemento do array, de modo a controlar o ângulo de deflexão do feixe acústico emitido pelo array.

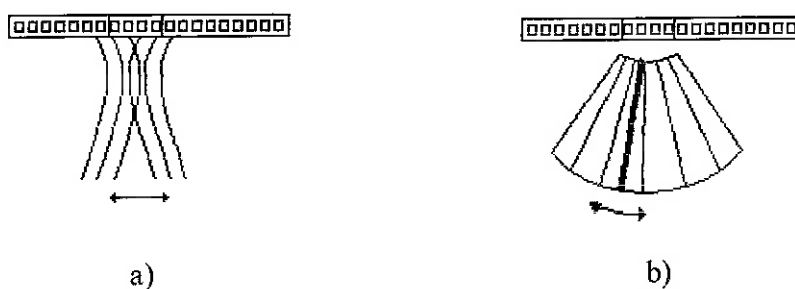


Figura 2.6 - Tipos de varredura: a) Varredura linear, b) Varredura setorial

Para se caracterizar uma determinada falha é preciso de algumas ferramentas (Fritsch, 2001):

1. Para se saber a posição em que se encontra a falha, basta verificar o período de tempo t entre a emissão do sinal ultra-sônico e a chegada do sinal refletido pela falha. Sabendo-se a velocidade c de propagação da onda no material (suposta constante), é possível obter a distância z entre o transdutor e a falha através da seguinte definição:

$$z = \frac{ct}{2}, \quad (2)$$

onde o fator 2 se deve ao fato da viagem de ida e de volta da onda;

2. A amplitude do sinal de eco recebido pelo transdutor depende da relação de impedâncias acústicas entre o meio de propagação e a descontinuidade, assim como as características geométricas (tamanho, orientação, etc.). Desta forma, com a amplitude do sinal caracteriza-se a geometria da falha naquele local onde foi emitida a onda ultra-sônica;

3. Fazendo-se a varredura da peça através das formas vistas acima e registrando-se os ecos, pode-se visualizar a falha em uma tela.

A profundidade de foco está associada ao comprimento da região focada. Para um sistema oferecer boa resolução lateral numa grande gama de profundidades, é necessária uma boa profundidade de foco (fig. 2.7).

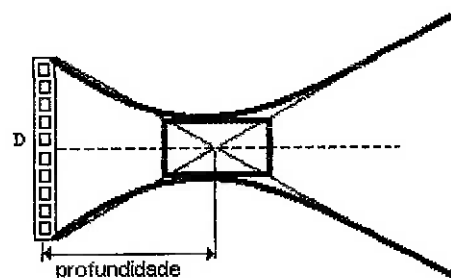


Figura 2.7 – Profundidade de foco de um array

Para se caracterizar um array é preciso observar a caracterização de um monoelemento. Além disso, deve-se verificar se há um desacoplamento elétrico entre os elementos do array para que sejam independentes.

Existem três passos que devem ser seguidos para se caracterizar um transdutor piezelétrico monoelemento (Akhnak, 2002). Primeiramente é feita a caracterização

eletromecânica, quando deve ser estudada a impedância elétrica de entrada e compará-la com a previsão teórica do modelo do transdutor feito no ANSYS. Em seguida deve ser verificado se o transdutor vibra de maneira uniforme na banda de frequências de trabalho, isto é, se a ressonância mecânica corresponde a um modo homogêneo de vibração. Esta etapa é chamada de caracterização vibracional. Finalmente resta comprovar se o transdutor origina um campo acústico como o previsto no modelo – caracterização acústica.

2.3. Focalização

A focalização é obtida através de atrasos que têm como objetivo compensar as diferenças de tempo de propagação de cada elemento até o foco F (fig. 2.8). Com a configuração de atrasos escolhida, as ondas se propagam de cada elemento coincidindo em fase em certo ponto F, onde se obtém uma alta intensidade de campo ultra-sônico, soma de todas as intensidades dos sinais individuais.

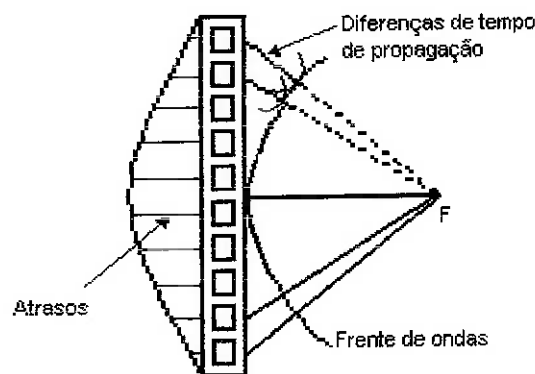


Figura 2.8 – Focalização de um array

Para que todos os sinais cheguem simultaneamente a F, é importante calcular com precisão os atrasos. Considerando que o meio é homogêneo, a velocidade de propagação é c , o elemento está a uma altura x , a propagação ocorre ao longo de z e o foco está sobre o eixo principal a uma distância R da origem (fig. 2.9):

$$L_x = \sqrt{R^2 + x^2} \quad (3)$$

O tempo de propagação desde o elemento em função de x é:

$$T_p(x) = \frac{L_x}{c} = \frac{1}{c} \sqrt{R^2 + x^2} \quad (4)$$

A focalização em emissão atrasa o disparo de cada um dos elementos do array uma quantidade $T_D(x)$ de forma que todos os sinais cheguem simultaneamente em F. ou seja $T_D(x) + T_p(x) = \text{constante para todo } x$ (5)

Esta constante é maior ou igual ao tempo de propagação desde o elemento central até a distância focal, $\frac{R}{c}$, assim:

$$T_D(x) + T_p(x) = \frac{R}{c} + T_A \quad (6)$$

onde $T_A \geq 0$, então as ondas chegam em F no instante:

$$t = \frac{R}{c} + T_A \quad (7)$$

Substituindo (4) em (6) e fazendo os cálculos necessários:

$$T_D(x) = T_A + \frac{R}{c} - \frac{\sqrt{R^2 + x^2}}{c} \quad (8)$$

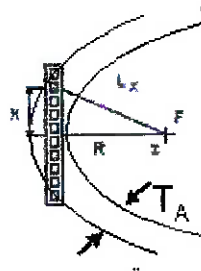


Figura 2.9 – Cálculo da posição focal

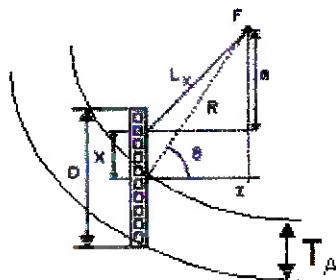


Figura 2.10 – Focalização e deflexão

Seguindo a (fig. 2.10) calcula-se a deflexão (Lee *et al.*, 2000):

$$a = R \sin(\theta) - x \quad (9)$$

$$L_x = \sqrt{R^2 + x^2 - 2Rx \sin(\theta)} \quad (10)$$

Como no caso anterior, se aplica um atraso no disparo de cada elemento para que

todas as ondas cheguem simultaneamente em F, no instante $t = \frac{R}{c} + T_A$, onde T_A é uma constante arbitrária. Assim o atraso $T_D(x)$ aplicada a excitação do elemento em x para focalizar em R com um ângulo de deflexão θ é:

$$T_D(x) = T_A + \frac{R}{c} - \frac{\sqrt{R^2 + x^2 - 2Rx \sin(\theta)}}{c} \quad (11)$$

Esta equação pode ser reescrita como:

$$T_D(x) = T_A + \frac{R}{c} - \frac{R}{c} \sqrt{1 + \frac{x^2}{R^2} - \frac{2x \sin(\theta)}{R}} = T_A + \frac{R}{c} - \frac{R}{c} \sqrt{1 + p} \quad (12)$$

Considerando que o foco está suficientemente distante $R \gg D/2 \geq x$, então, p tem um valor pequeno, considerando os dois primeiros termos da expansão em série:

$$\sqrt{1 + p} \Big|_{p \rightarrow 0} \approx 1 + \frac{p}{2} \quad (13)$$

$$T_D(x) \approx T_A - \left(\frac{x^2}{2Rc} - \frac{x \sin(\theta)}{c} \right) \quad (14)$$

Conhecida por aproximação binomial. O termo quadrático desta expressão corresponde à focalização (depende de R mas não de θ), enquanto que o termo seguinte corresponde à deflexão (depende de θ mas não de R). Porém os dois termos dependem da posição do elemento x.

Para se realizar apenas a deflexão do feixe, sem focalização, basta fazer $R \rightarrow \infty$ em (14), então os atrasos a serem aplicados a cada um dos elementos é dado por:

$$T_D(x) = T_A + \frac{x \sin(\theta)}{c} \quad (15)$$

2.4. Método dos Elementos Finitos

Os modelos comumente utilizados para simular o comportamento mecânico e elétrico dos transdutores piezelétricos geralmente introduzem hipóteses simplificadoras, que nem sempre são válidas para situações reais (Silva, 1993). Entre esses modelos, os mais comuns são os que utilizam circuitos elétricos equivalentes para representar o transdutor, considerando um comportamento unidimensional, ou seja, as dimensões da secção do transdutor são muito maiores do que a sua espessura, não havendo, portanto, movimento transversal.

Entretanto, as geometrias dos modelos utilizados na prática são normalmente bi (2-D) ou tridimensionais (3-D), o que faz com que as hipóteses unidimensionais adotadas pelos circuitos elétricos estejam longe da realidade. Para as simulações 2-D e 3-D do meio piezelétrico, um conjunto completo de equações fundamentais que governam esse meio devem ser resolvidas. Na literatura encontram-se muitos autores que resolveram essas equações para casos particulares, chegando a soluções aproximadas através de métodos numéricos.

O método de elementos finitos apresenta-se como uma boa opção, pois é suficientemente geral para resolver essas equações diferenciais e permite manipular geometrias complexas em 2-D e 3-D, constituindo um método de análise aplicável a qualquer configuração de transdutor. Assim, a utilização do método de elementos finitos aplicado à piezeletricidade permite uma simulação rápida e precisa do transdutor, sendo utilizado com frequência no projeto de transdutores.

É importante ressaltar que outros métodos numéricos tão gerais quanto o de elementos finitos, também podem ser utilizados nesse tipo de problema, podendo-se analisar as vantagens e desvantagens de cada um. Porém, o método de elementos finitos, além de preciso, é também bastante utilizado devido à evolução computacional, estendendo-se sua aplicação a diversas áreas da engenharia.

3. Modelagem

As análises numéricas utilizadas são realizadas pelo MEF, utilizando o software ANSYS, onde são obtidos o campo acústico e frequências de ressonância para posterior análise e construção do protótipo. O Matlab será utilizado para gerar os arquivos ASCII a serem carregados no ANSYS com as propriedades dos materiais utilizados nas simulações tais como PZT5A, araldite e alumínio. O Matlab também gerará a onda senoidal (de voltagem) que excitará os elementos presentes no array piezelétrico.

3.1. Modelagem Software ANSYS

O tamanho da discretização utilizado para a simulação no ANSYS leva em consideração o comprimento de onda no material em análise. Para isso segue-se a seguinte equação:

$$c = \lambda \cdot f \quad (20)$$

onde c é a velocidade de propagação da onda no material, f é a frequência da excitação e λ é o comprimento de onda.

Utiliza-se uma discretização de $\frac{\lambda}{20}$ para que a aproximação dos resultados seja boa.

Este valor foi obtido através da realização da convergência de várias simulações e comparando-se os resultados para valores maiores até que a diferença tornou-se desprezível.

Para se obter a discretização no tempo basta dividir o tempo de um ciclo da onda (período) por 20, ou seja, o valor utilizado será igual a $\frac{1}{2 \times 10^6} \times \frac{1}{20} = 2.5 \times 10^{-8} \text{ s}$. A frequência central do transdutor é de 2 MHz.

O modelo tem apenas 8 elementos, suficiente pra que se possa analisar as características do array, o microprocessador necessita de, em média, 8 horas para resolver a

simulação, devido ao custo computacional elevado não é apropriado aumentar muito o tamanho do modelo do array.

3.1.1. Propagação Sem Focalização

Na (fig. 3.1) observa-se a resposta em pressão gerada quando todos os elementos do array foram excitados ao mesmo tempo. A excitação utilizada foi uma voltagem senoidal com amplitude máxima de 1 volt e com a utilização de apenas um período (fig. 3.2). O ponto de observação para a verificação do campo é o ponto central do meio de propagação da onda, ponto A, (fig. 3.3) cujas coordenadas são $x = 14.64$ mm e $y = 10$ mm.

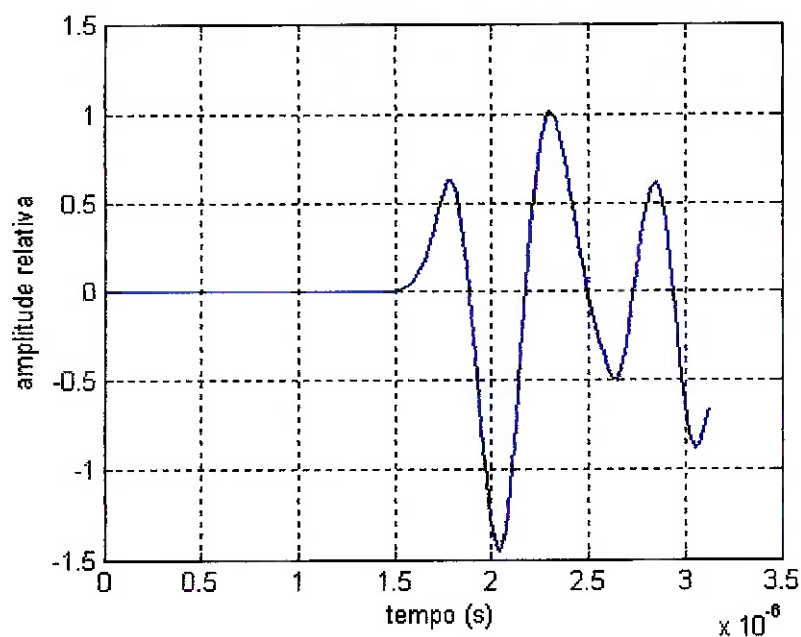


Figura 3.1 – Resposta em pressão sem focalização

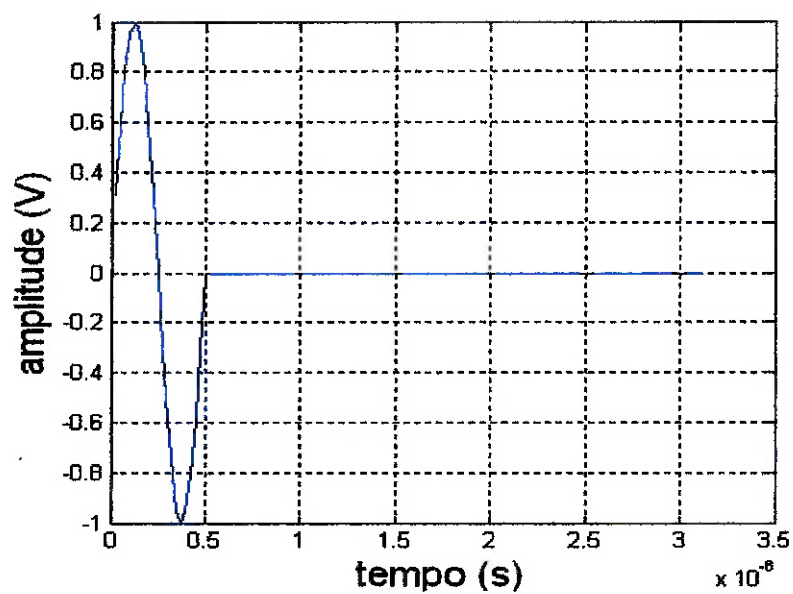


Figura 3.2 – Excitação da cerâmica

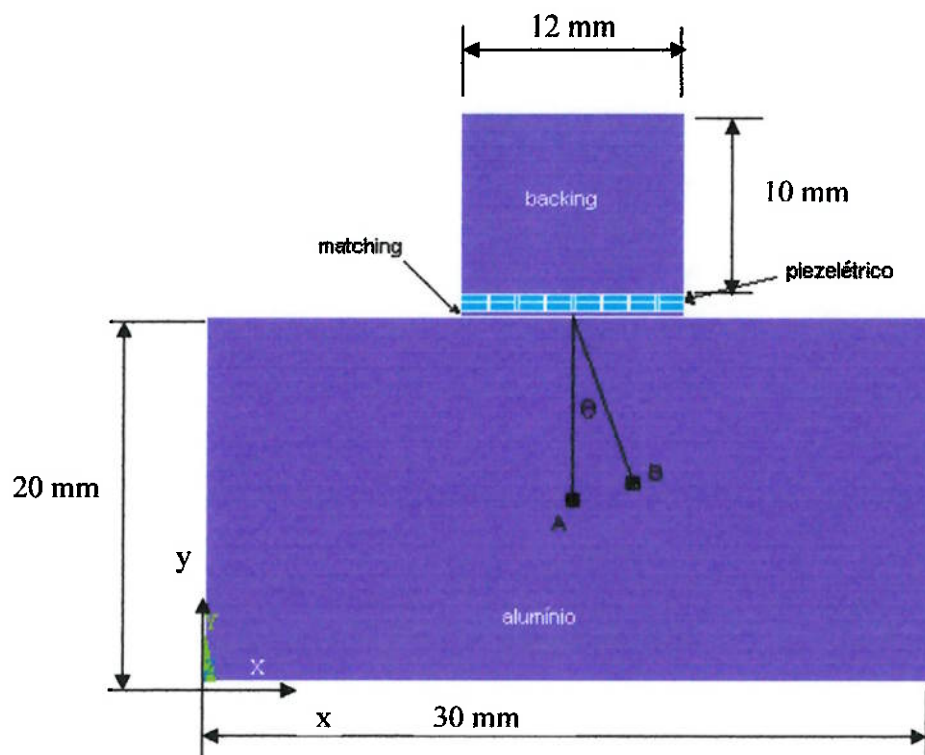


Figura 3.3 – Modelo do array no ANSYS

Na simulação da propagação da onda sem focalização, como foi dito anteriormente, todos os elementos do array são excitados ao mesmo tempo. Como resultado a onda se

propaga pra frente e começa a fazer uma abertura, diminuindo de amplitude conforme a distância aumenta (fig. 3.4).

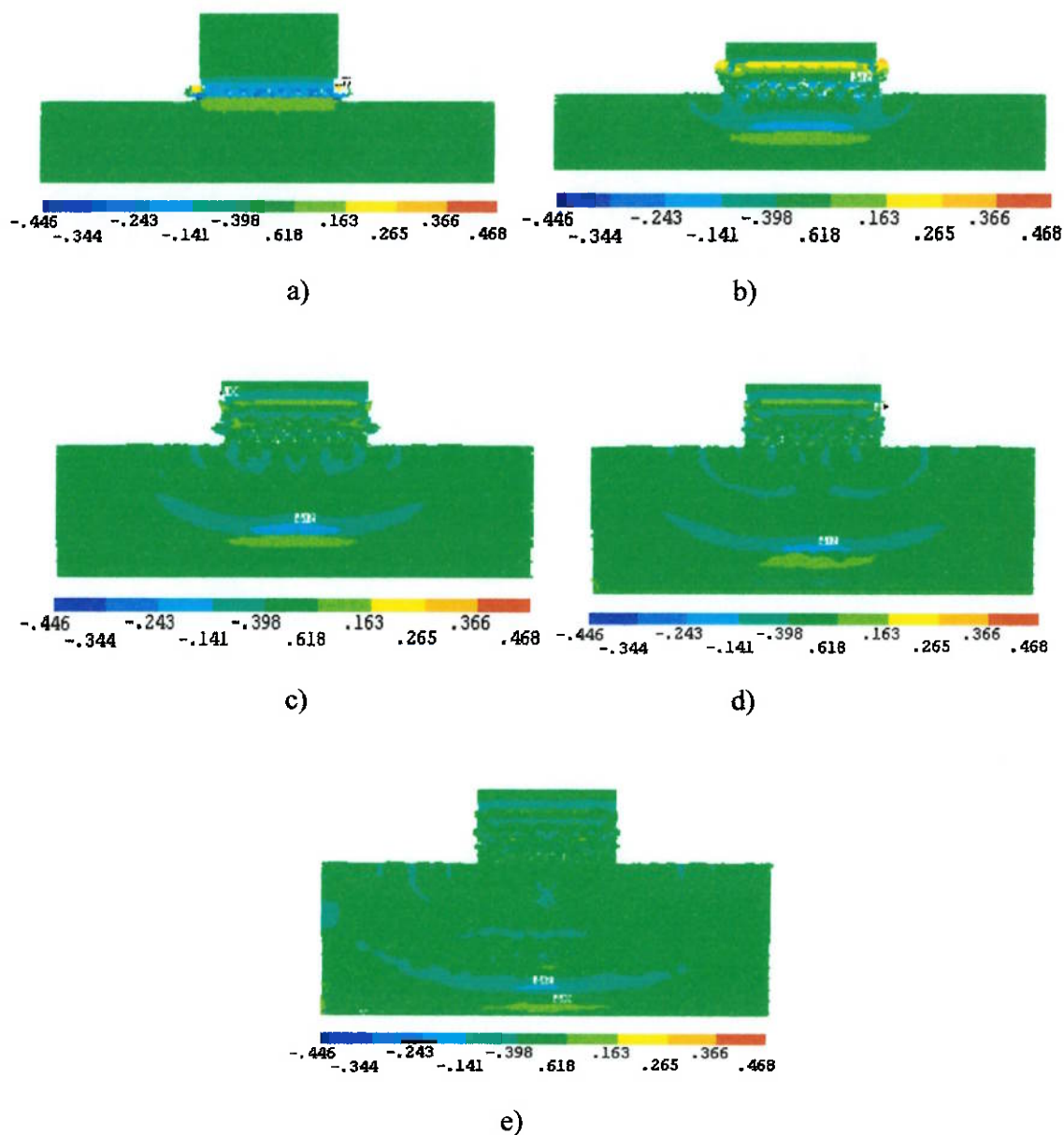


Figura 3.4 - Propagação da onda sem focalização a) primeiro passo
b) passo 44, após 1.10×10^{-6} s c) passo 75, após 1.88×10^{-6} s
d) passo 94, após 2.35×10^{-6} s e) passo 119, após 2.98×10^{-6} s

3.1.2. Propagação Com Focalização

O cálculo do foco no modelo é muito simples. Primeiro escolhe-se o ponto de focalização, no caso, o ponto escolhido foi o mesmo ponto do item anterior, com $x = 14.46$ mm e $y = 10$ mm. Em seguida calcula-se a distância d_i entre o foco e o ponto alinhado ao centro da cerâmica (fig. 3.5).

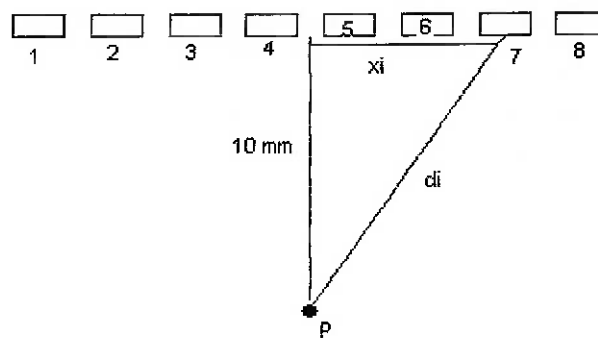


Figura 3.5 – Cálculo do foco

Para se obter d_i basta usar Pitágoras:

$$d_i = \sqrt{.01^2 + (x_i - x)^2} \quad (21)$$

Para que os sinais enviados pelos elementos cheguem ao foco, todos ao mesmo tempo, é preciso que os elementos mais distantes sejam excitados primeiro e os seguintes sejam excitados com um atraso determinado. Para se calcular o tempo necessário para o sinal chegar ao foco divide-se a distância pela velocidade de propagação:

$$t_i = \frac{d_i}{c} \quad (22)$$

O atraso Δt_i é calculado subtraindo-se o menor tempo de propagação ($t_{\min}$), do tempo de cada elemento. Como a simulação tem uma determinada discretização, cada passo ocorre com uma diferença de tempo de $\Delta t = 2.5 \times 10^{-8}$ s, o atraso é imposto pelo passo n_i no qual o sinal de voltagem é acionado.

$$\Delta t_i = t_i - t_{\min} \quad (23)$$

$$n_i = \frac{\Delta t_i}{\Delta t} + 1 \quad (24)$$

No modelo $x = 14.46 \text{ mm}$ e $y = 10 \text{ mm}$.

$$d_1 = d_8 = 11.33 \text{ mm}, t_1 = t_8 = 1.81 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$d_2 = d_7 = 10.71 \text{ mm}, t_2 = t_7 = 1.86 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$d_3 = d_6 = 10.27 \text{ mm}, t_3 = t_6 = 1.94 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$d_4 = d_5 = 10.03 \text{ mm}, t_4 = t_5 = 2.05 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$t_{\min} = 1.81 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$\Delta t_2 = 0.05 \times 10^{-6} \text{ s}, n_2 = 3$$

$$\Delta t_3 = 0.13 \times 10^{-6} \text{ s}, n_3 = 6$$

$$\Delta t_4 = 0.24 \times 10^{-6} \text{ s}, n_4 = 10$$

E o sinal de excitação fica sendo como o visto na figura 3.6, com o sinal azul sendo para os elementos mais distantes 1 e 8, o verde para os elementos 2 e 7, o vermelho para os elementos 3 e 6 e o sinal azul claro para os elementos mais próximos 4 e 5, assim todos os sinais chegarão ao foco no mesmo instante.

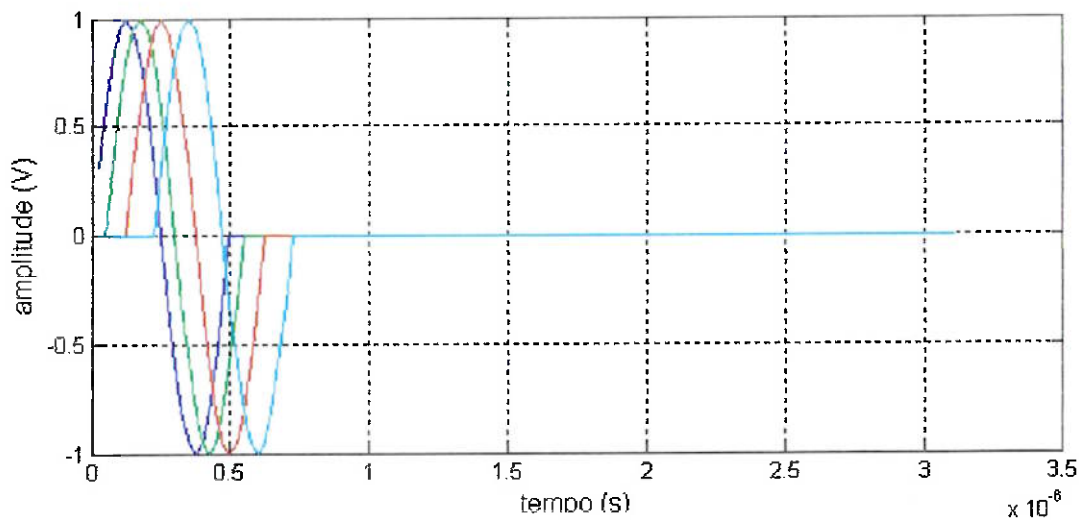


Figura 3.6 – Excitação dos elementos do array com atrasos

A resposta em pressão para a excitação com focalização no mesmo ponto que no caso sem focalização pode ser visto na figura 3.7. O que se percebe comparando-se com o caso sem focalização é que a amplitude do sinal é maior e o pico fica mais definido em um período de tempo menor.

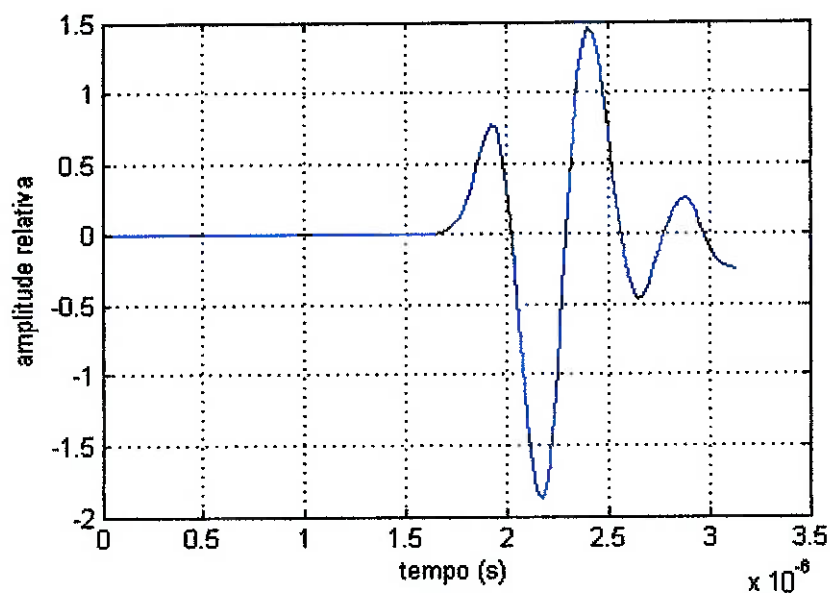
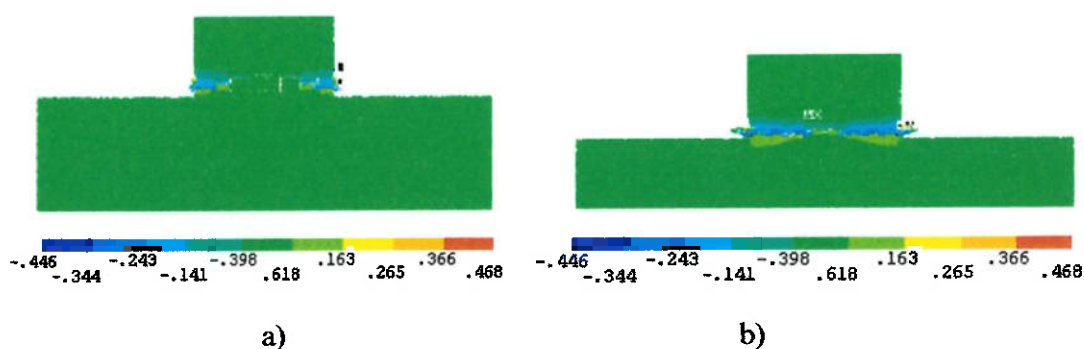


Figura 3.7 – Resposta em pressão com focalização

Na simulação da propagação da onda com focalização, é aplicado um atraso na excitação dos elementos do array que estão mais próximos do foco, de forma que todos os sinais cheguem ao foco no mesmo tempo, como resultado a onda se propaga pra frente e começa a fazer um movimento convergente, até chegar ao foco. A amplitude da onda é maior do que no caso sem focalização devido à soma dos sinais, em seguida a onda começa a abrir e diminuir de amplitude com a distância.



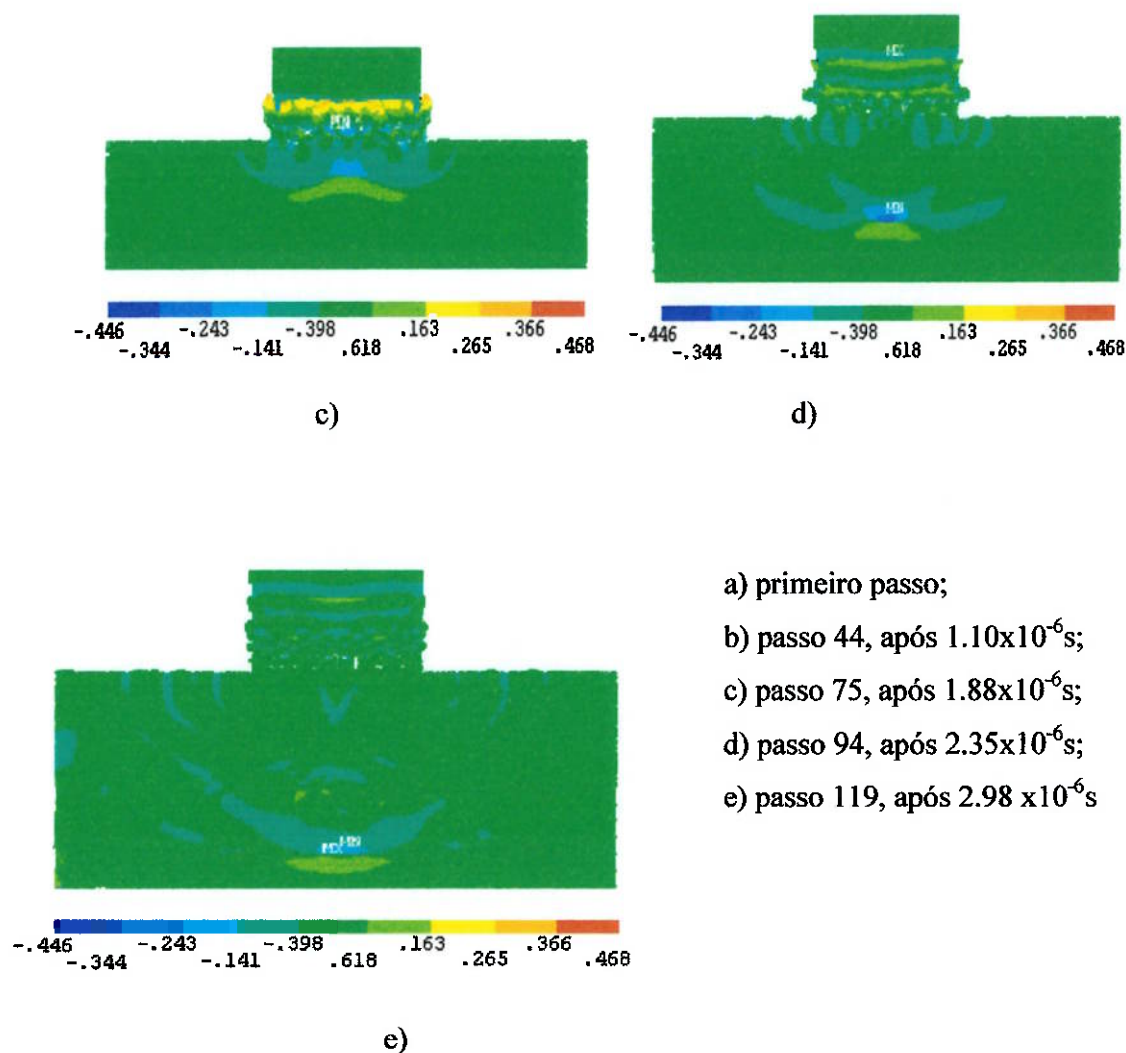


Figura 3.8 - Propagação da onda com focalização

3.2. Modelagem no Software Matlab

O Matlab é um software de análise numérica que também permite a realização de simulações de propagação de onda. Seguem os resultados obtidos na simulação.

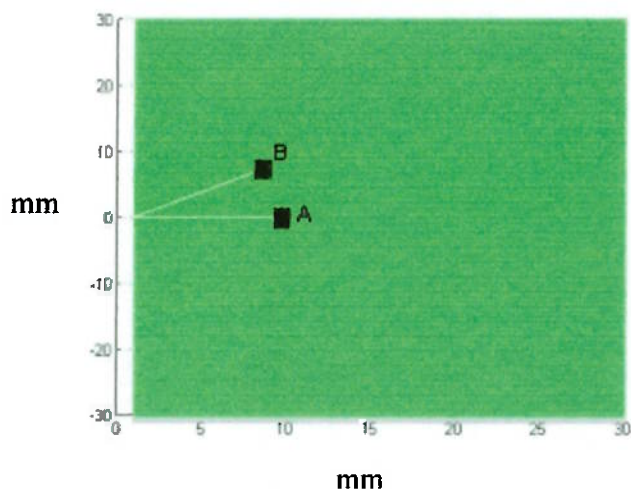


Figura 3.9 – Pontos a serem analisados

3.2.1. Propagação Sem Focalização

Na figura 3.10 o que se observa é a resposta em pressão no ponto central do meio de propagação, ponto A, para uma simulação sem focalização, com todos os elementos sendo excitados simultaneamente, porém nesse caso a simulação foi feita no Matlab. Nesse exemplo a excitação tem apenas um ciclo de onda senoidal.

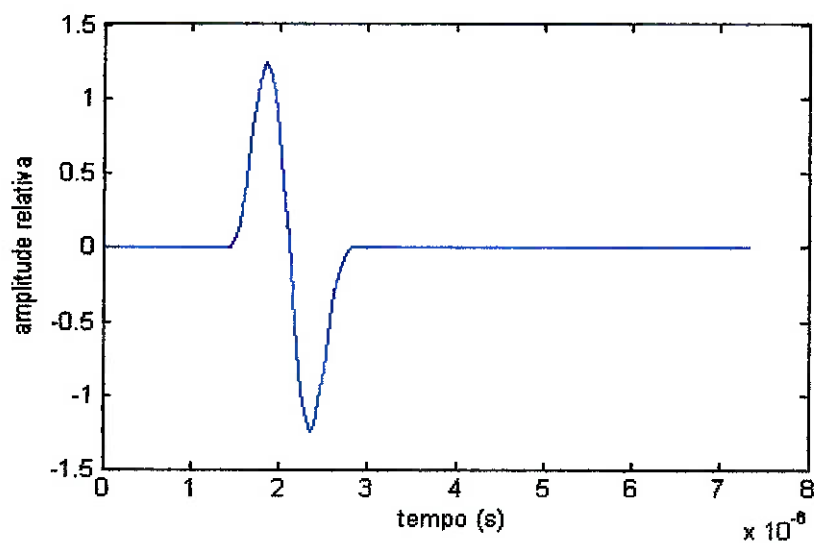


Figura 3.10 – Resposta em pressão sem focalização com excitação senoidal

Na figura 3.11 observa-se o campo acústico no mesmo ponto que no caso anterior, porém dessa vez a excitação foi feita com 5 ciclos de onda senoidal.

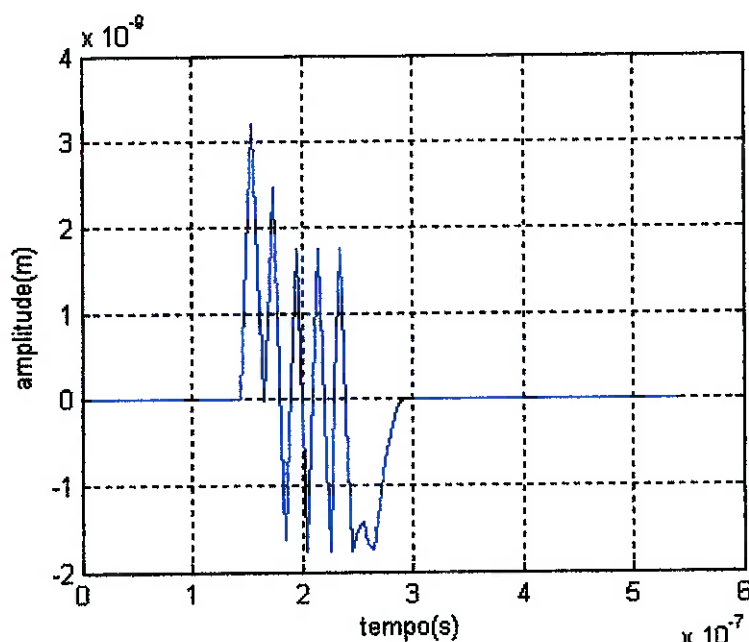
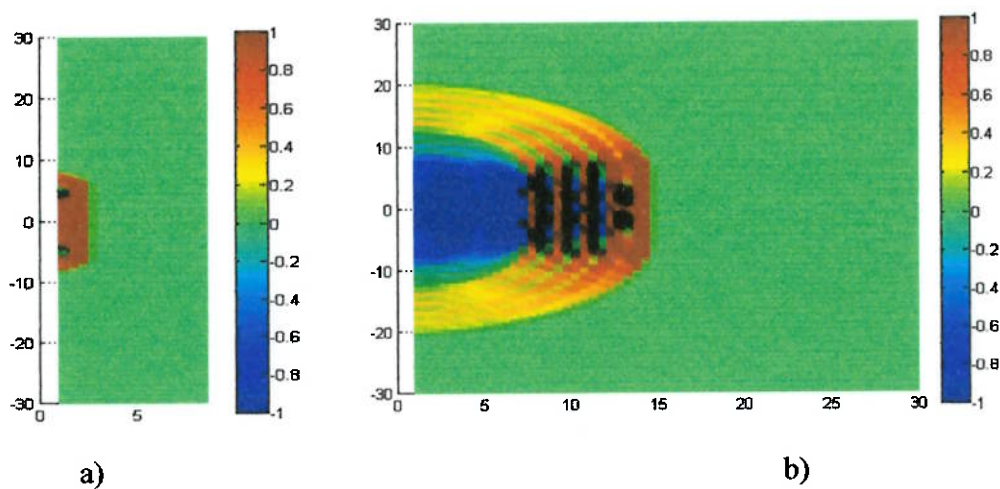


Figura 3.11 – Resposta em pressão sem focalização com excitação senoidal (5 ciclos)

Na próxima figura (fig. 3.12), é vista a propagação da onda sem focalização, desta vez, porém a simulação é feita com o uso do Matlab. A onda se propaga para frente e começa a fazer uma abertura, diminuindo de amplitude conforme a distância aumenta, como o ocorrido na simulação realizada anteriormente no ANSYS.



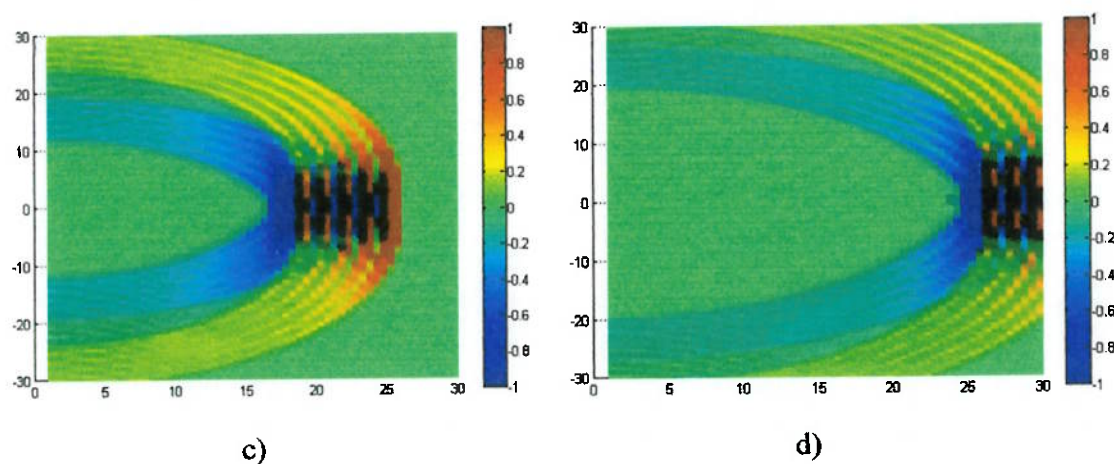


Figura 3.12 - Propagação da onda sem focalização no tempo

3.2.2. Propagação Com Focalização

Na figura 3.13 o que se observa é a resposta em pressão no mesmo ponto do meio de propagação, para uma simulação com focalização. A excitação tem apenas um ciclo de onda senoidal.

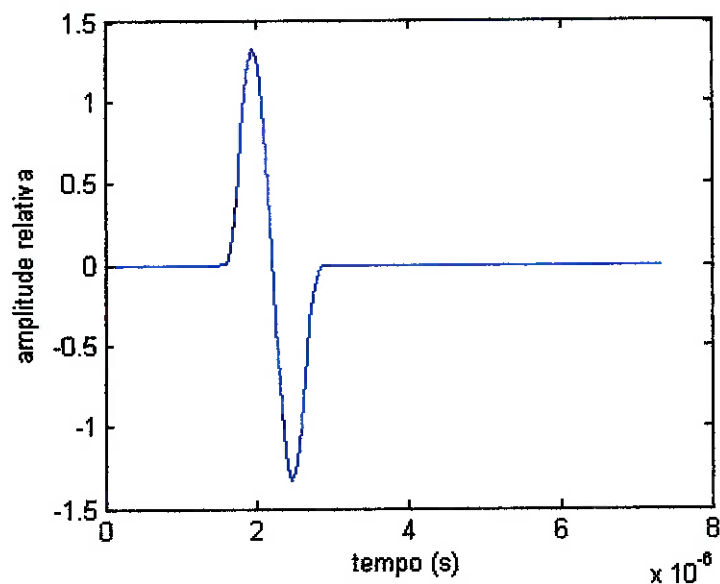


Figura 3.13 – Resposta em pressão com focalização com excitação senoidal

Na próxima simulação foi utilizada uma excitação com 5 ciclos de onda senoidal (fig. 3.14).

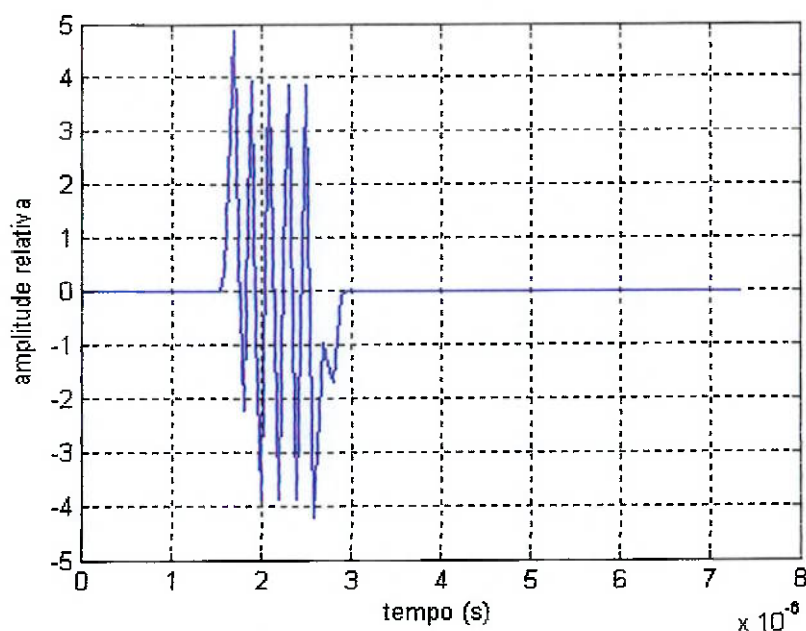


Figura 3.14 - Resposta em pressão com focalização com excitação senoidal (5 ciclos)

Na próxima figura (fig. 3.15), é observada a propagação da onda na simulação feita no Matlab. A onda se propaga pra frente e começa a fazer um movimento convergente, até chegar ao foco. A amplitude é maior do que no caso sem focalização devido a soma dos sinais. Em seguida ela começa a abrir e diminuir de amplitude com a distância.

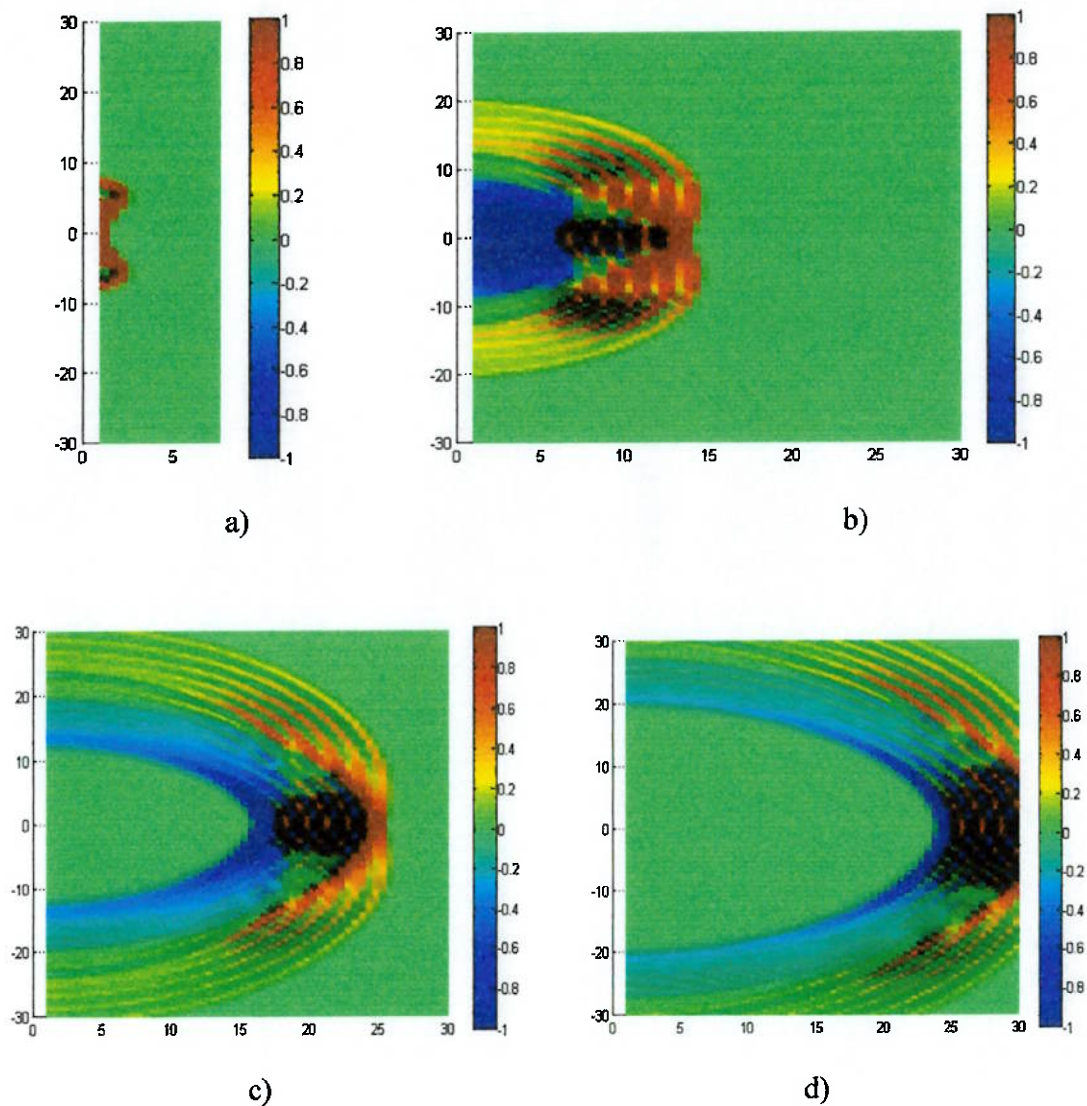


Figura 3.15 - Propagação da onda com focalização no tempo

4. Construção do Array

4.1. Características Construtivas

O dimensionamento do array é feito basicamente de acordo com as características físicas e comportamento do sistema. A esses fatores, adiciona-se a disponibilidade de material e máquina com seus componentes utilizados para a fabricação do array.

A cerâmica a ser utilizada é composta por material piezelétrico do tipo PZT-5A e tem como dimensões 14mm x 1mm x 30mm. O passo, que é a distância entre os centros de dois elementos consecutivos do array, a ser utilizado é de 1.32mm. Este valor deveria ser menor que a metade do comprimento de onda no material de propagação:

$$p \leq \frac{\lambda}{2}, \text{ onde } p \text{ é o passo}$$

O passo deve ter essa relação com o comprimento de onda para que não haja formação de lóbulos secundários, o que reduz a qualidade do sinal e dificulta a leitura.

Desta forma escolhe-se uma frequência não muito alta para que o passo não seja muito pequeno, isso é feito porque quanto menor o passo, maior é a dificuldade de construção e maior é a possibilidade de se obter um resultado insatisfatório, em que o array não funciona de acordo com o esperado.

A cerâmica será dividida em duas partes para que o array não seja muito grande, o objetivo do trabalho não é construir um array com muitos elementos, mas montar um transdutor grande o suficiente para que se possa estudar o seu comportamento. Como o passo é 1.32mm e em geral os elementos das pontas não ficam muito regulares, será possível montar arrays com aproximadamente 12 elementos.

4.2. Montagem

A primeira etapa na montagem do array consiste na soldagem de uma folha de cobre de 0.1mm de espessura sobre uma cerâmica retangular, conforme mostra a (fig 4.1). A função da folha é compor os eletrodos que estarão ligados em cada elemento do array.

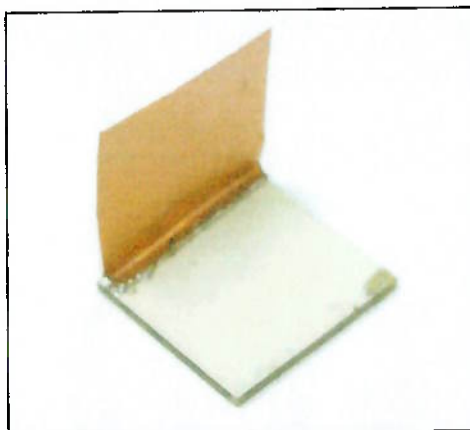


Figura 4.1 - Soldagem da folha na cerâmica

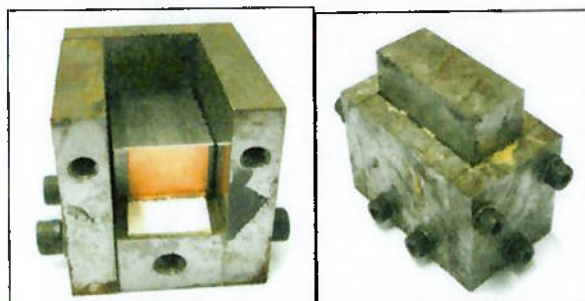


Figura 4.2 – Molde

Após a soldagem da folha, a cerâmica é colocada dentro de um molde metálico onde é montado o backing sobre a cerâmica (fig. 4.2). O backing é composto de uma mistura de epóxi-tungstênio na proporção de 70% de araldite comum e 30% de tungstênio em volume e a cura é feita numa estufa à temperatura de 50°C.

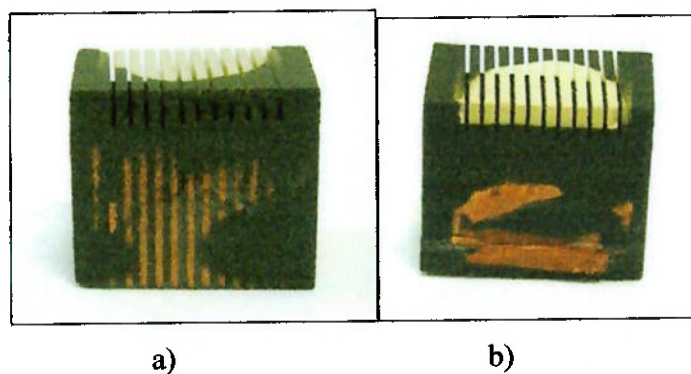


Figura 4.3 – a) Array com eletrodos, b) Terra

Após a cura é possível cortar a cerâmica com passo de 1.32mm na máquina de corte, utilizando-se um disco diamantado de 0.3mm de espessura, como mostra a (fig. 4.3). Neste trabalho, a relação $p \leq \frac{\lambda}{2}$ não foi satisfeita para o array de 1 MHz devido à dificuldade em se fabricar arrays com passos menores do que $\frac{\lambda}{2} = 0.75\text{mm}$. Em seguida devem-se preencher os espaços vazios causados pelos cortes, utilizando o material de preenchimento, que é uma mistura de resina GY956 e endurecedor na proporção de 10:2, como mostra a (fig. 4.4).



Figura 4.4 – Preenchimento dos cortes

A próxima etapa é a soldagem dos eletrodos e o isolamento dos eletrodos com um material termo-retrátil. Depois os eletrodos devem ser unidos por cola para que não fiquem soltos de forma que possam se quebrar, conforme a (fig.4.5).

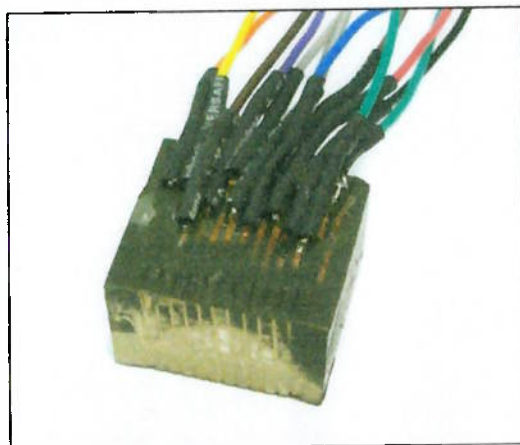


Figura 4.5 – Fios soldados nos eletrodos

Para completar o array é necessário fazer o seu encapsulamento (fig 4.6). A cápsula é um pequeno tubo de alumínio, para fixar o array no interior do tubo foi utilizado araldite para preenchimento dos espaços vazios.

A próxima etapa é fazer o matching com araldite. Durante a montagem do array deve-se dar atenção aos contatos dos eletrodos, de forma que fiquem com boa conexão à cerâmica e tenham uma boa resistência mecânica para que não se quebrem durante o manuseio.

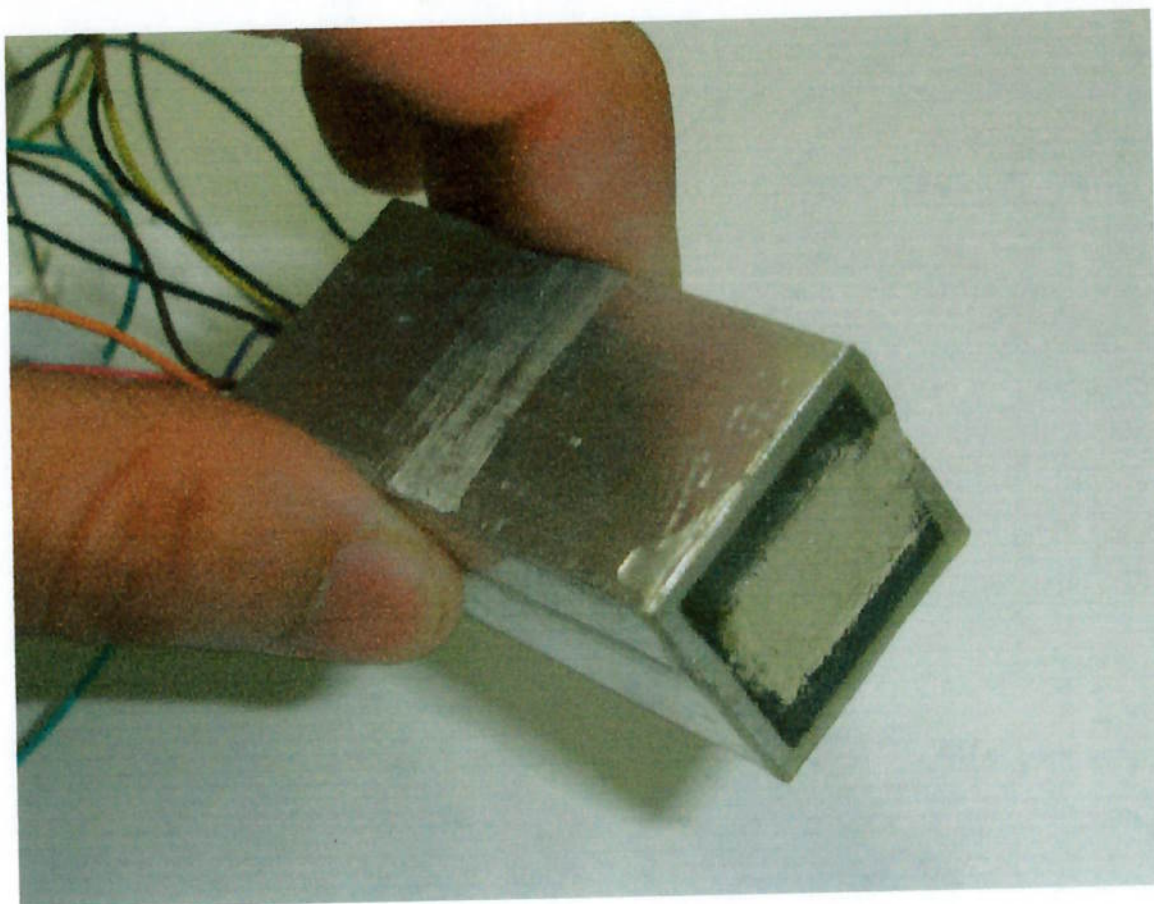


Figura 4.6 - Array encapsulado

5. Procedimento Experimental e Resultados

O procedimento experimental foi feito no Laboratório de Ultra-som da Escola Politécnica. Para os experimentos, os equipamentos disponíveis foram:

- Um pulser que emite um pico de tensão que faz a excitação da cerâmica;
- Um osciloscópio para adquirir o sinal do array;
- Um tanque com água como meio de propagação das ondas acústicas;
- Cabos para fazer toda a ligação entre o array, pulser, osciloscópio e PC.

Veja a (fig. 5.1) a seguir:

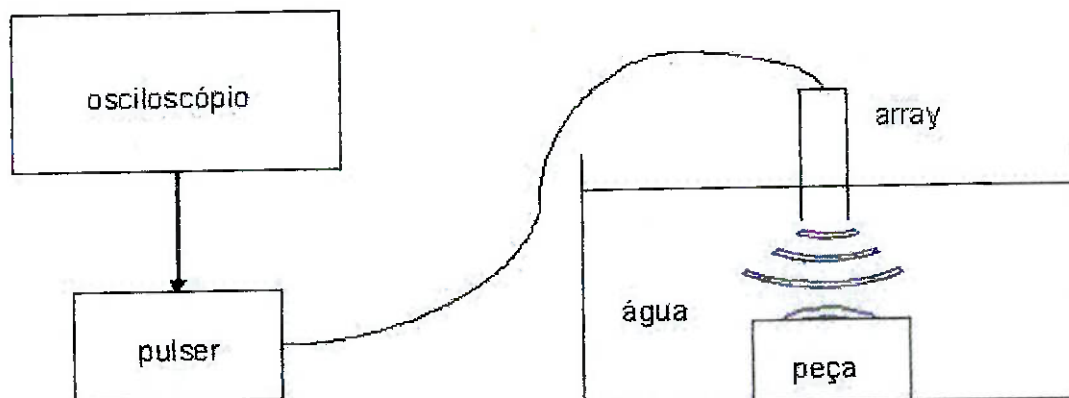
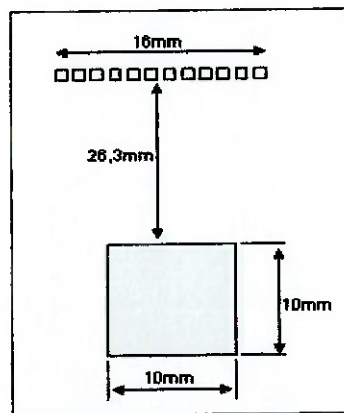


Figura 5.1 – Esquema para aquisição de dados

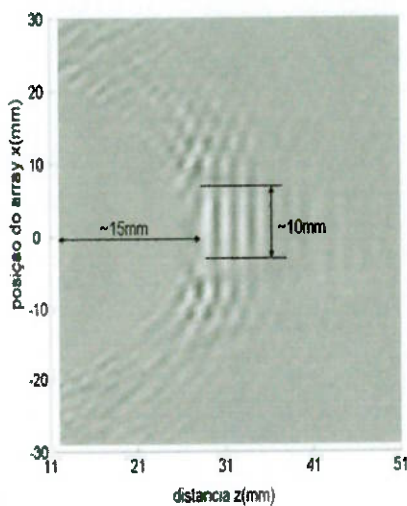
Toda a aquisição de dados foi realizada excitando sempre um único elemento de cada vez. Não foi possível efetuar emissão com todos os elementos ao mesmo tempo, porque o laboratório não dispõe de eletrônica que possibilite aplicar leis de atraso na excitação dos elementos. Pode-se no máximo emitir com apenas um elemento e receber com ele mesmo, operando no modo pulso-eco. Após um elemento estar conectado ao pulser, roda-se um programa, feito em Matlab, que dispara o pulser excitando a cerâmica e gerando as ondas acústicas. Todos esses dados são capturados pelo próprio programa, que também gera um arquivo de saída 'Teste1.m', o qual será utilizado para o processamento dos dados, para posterior geração das imagens em modo B. Passa-se então para o próximo elemento, e realiza-se o mesmo procedimento feito anteriormente, até o último elemento do array.

A seguir seguem os cinco experimentos realizados com as respectivas imagens obtidas em modo B, utilizando a técnica SAFT para aumentar o foco em imagens de origem ultra-sônica. Nestes experimentos, os corpos de provas foram imersos em água, com a distância de 26,3 mm da superfície da peça refletora até a superfície inferior do array, obtendo os seguintes resultados:

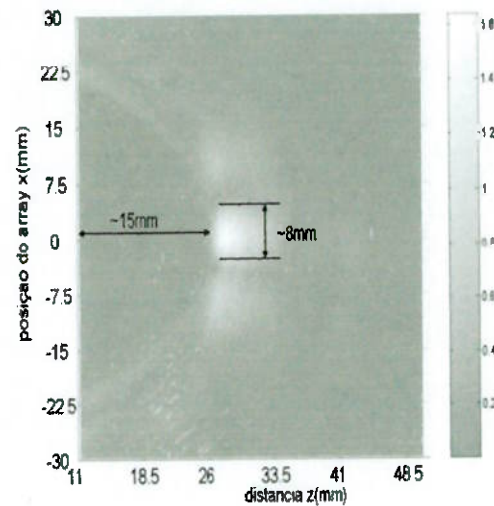
- Experimento 1: uma barra de cobre de 10x10 mm de lado como peça;



a)



b)



c)

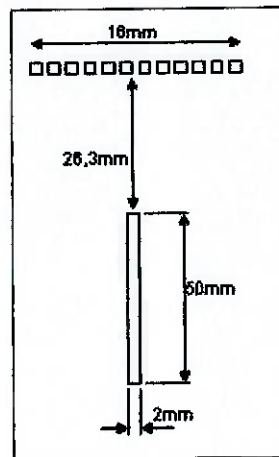
Figura 5.2 – a) Esquema para o primeiro experimento. b) Modo B com o sinal refletido. c) Com a envoltória do sinal retificado.

Na figura 5.2b) verifica-se que foi possível detectar a distância do objeto com uma boa precisão. A largura do objeto foi determinada com alguma precisão. Na figura 5.2c) há uma tentativa de melhorar o sinal. Como resultado, a imagem da peça fica mais caracterizada, pois foram reduzidos os sinais espúrios.

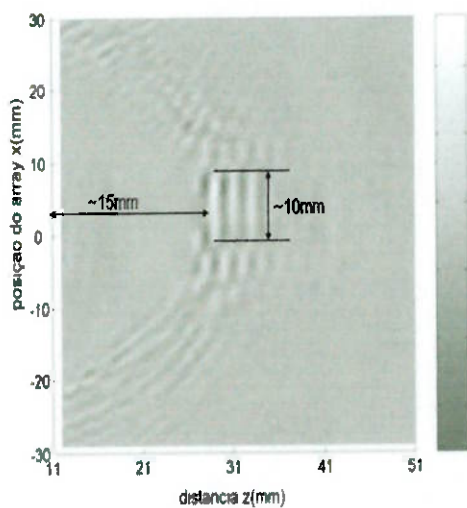
Como o objetivo deste trabalho não é fazer processamento de dados, ou seja, verificar o método no qual se obtém melhores resultados, mas sim verificar o

comportamento do transdutor, não se investiu muito em obter melhores imagens, pois a imagem obtida ficou bastante satisfatória.

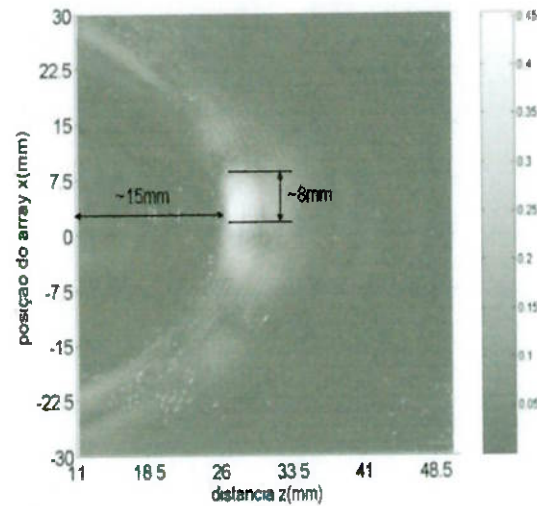
➤ Experimento 2: uma chapa de alumínio de 2 mm de espessura por 50 mm de altura;



a)



b)

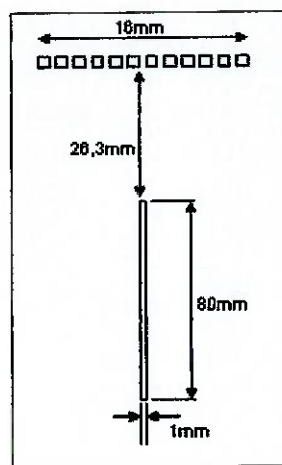


c)

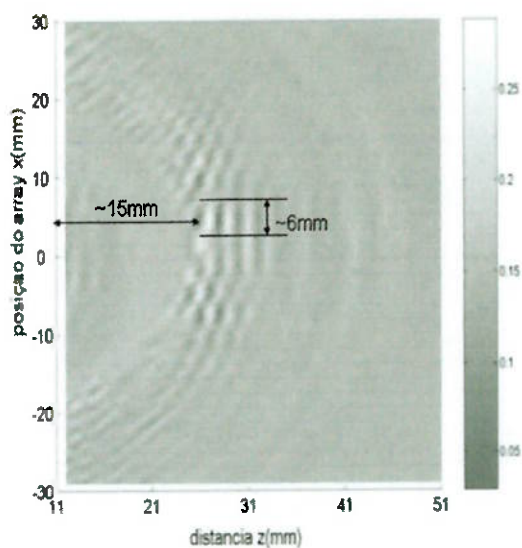
Figura 5.3 – a) Esquema para o segundo experimento. b) Modo B com o sinal refletido. c) Com a envoltória do sinal retificado.

Na imagem do segundo experimento (fig. 5.3b), pode ser visto que não há muita diferença com relação ao primeiro experimento, apesar da peça ser bem mais estreita que no primeiro caso. Isso ocorreu porque a resolução do array não é muito grande devido a sua pequena dimensão e também devido a erros de medição resultantes da montagem do sistema de medição e de cortes dos elementos do array.

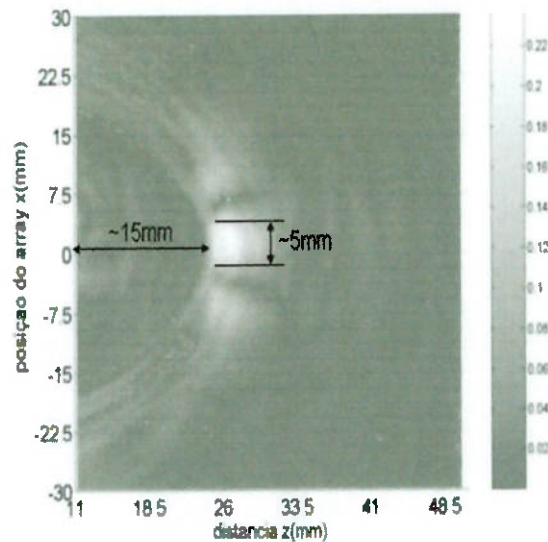
➤ Experimento 3: uma chapa de alumínio de 1mm de espessura por 80 mm de altura;



a)



b)

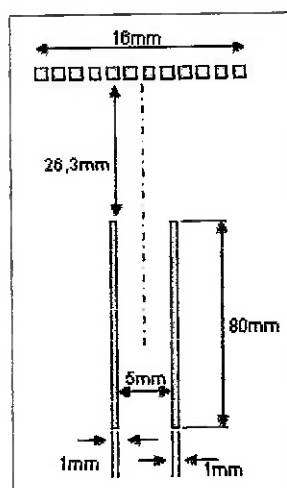


c)

Figura 5.4 – a) Esquema para o terceiro experimento. b) Modo B com o sinal refletido. c) Com a envoltória do sinal retificado.

No terceiro experimento, com a redução da espessura da peça, o tamanho apontado pelo transdutor também reduziu um pouco, no primeiro método de processamento não fica muito clara a posição real da peça, mas no segundo método fica bem nítido apesar de não ter uma boa precisão com relação a espessura da peça.

➤ Experimento 4: duas chapas de alumínio de 1 mm de espessura e 50 mm de altura, distanciadas de 5 mm uma da outra, com o eixo principal do array a 2,5 mm de distância das chapas;



a)

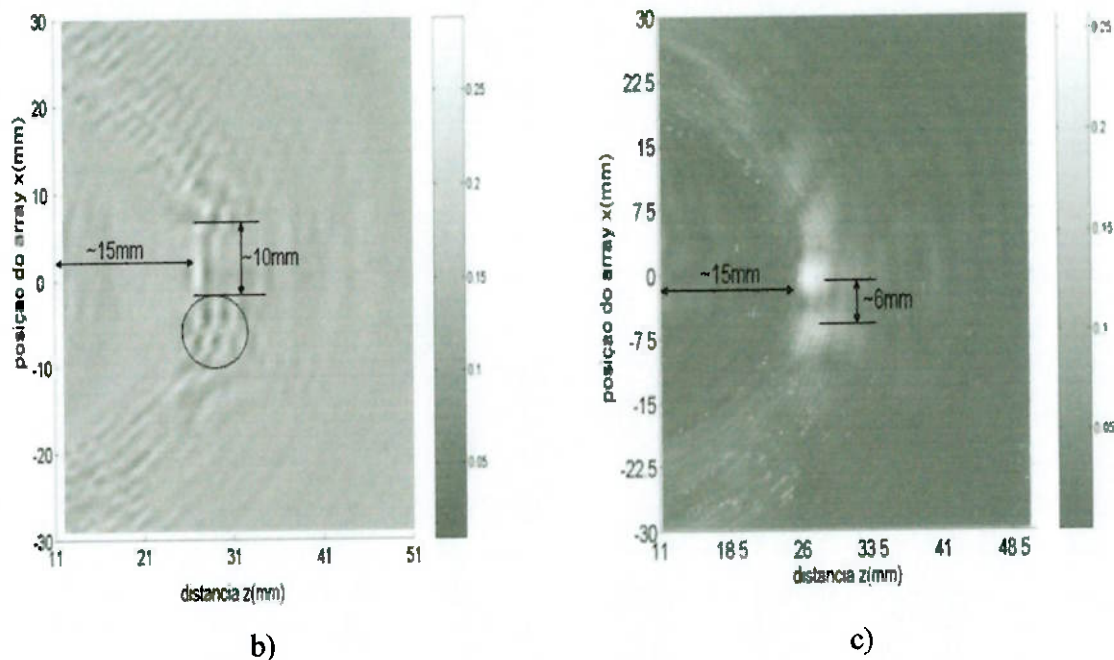
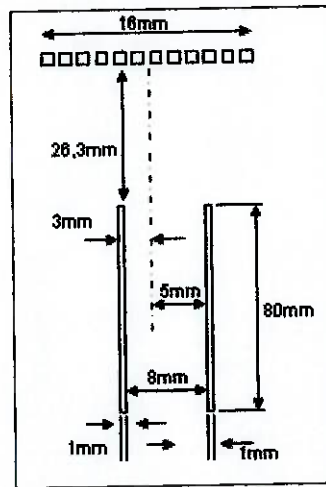


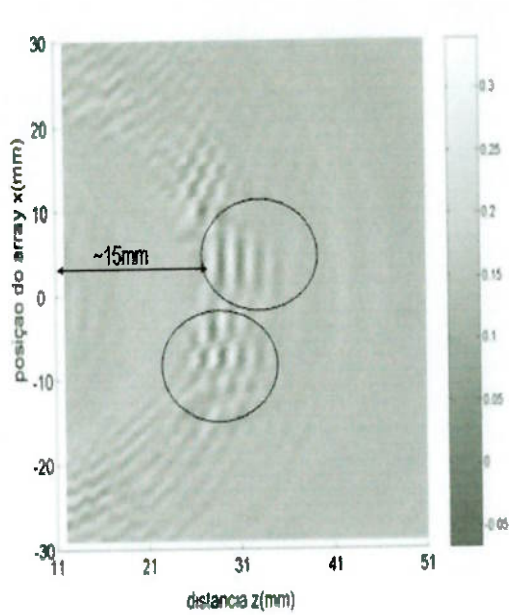
Figura 5.5– a) Esquema para o quarto experimento. b) Modo B com o sinal refletido. c) Com a envoltória do sinal retificado.

No quarto experimento fica bem mais visível que o segundo método de análise dos resultados é mais adequado. Com a utilização de duas pequenas placas, no primeiro método não fica bem determinada a presença de duas peças, porém no segundo método é possível perceber a presença das duas peças.

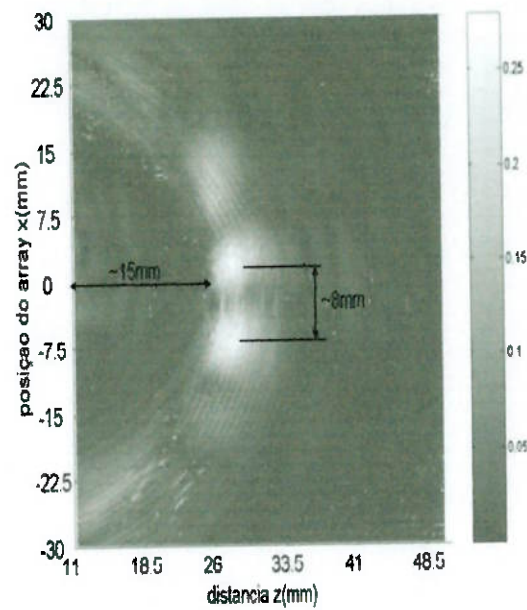
➤ Experimento 5: duas chapas de alumínio de 1 mm de espessura e 50 mm de altura, distanciadas de 8 mm uma da outra, com o eixo principal do array a 2,5 mm de distância de uma chapa e 5,5 mm da outra.



a)



b)



c)

Figura 5.6 – a) Esquema para o quinto experimento. b) Modo B com o sinal refletido. c) Com a envoltória do sinal retificado.

No quinto experimento, utilizando o primeiro método ainda é possível verificar a presença de duas falhas, o motivo de isso ter acontecido é que foi aumentada a distância entre as duas peças em relação ao quarto experimento, porém fica mais claro nessa figura

que o segundo método foi bem mais preciso para se analisar os resultados obtidos pelo transdutor.

Após o processamento dos resultados obtidos no laboratório, é necessário verificar se o transdutor se comportou de maneira adequada e para poder obter as imagens nas quais é possível identificar uma falha. Os dados obtidos fornecem a tensão elétrica em função do tempo. Isso pode ser explicado da seguinte forma: quando vamos fazer a leitura de dados excita-se a cerâmica do transdutor com um pulso elétrico. A cerâmica deforma-se, criando uma onda de deslocamento, que é a onda de ultra-som. Esta onda reflete-se em falhas ou objetos e retorna ao transdutor causando sua deformação que provoca uma tensão elétrica entre os eletrodos. Então são coletados os valores dessa tensão em função do tempo.

A figura (5.7) mostra o eco refletido numa interface de aço inoxidável, imersa em água a 26.3mm da superfície inferior do array, excitando todos os elementos ao mesmo instante. Analisando o gráfico é possível ver a reflexão da onda ultra-sônica no backing e na peça. Com essa análise é possível comprovar o funcionamento do transdutor, porém não é possível verificar seu comportamento. A reflexão no backing mostra que o seu material não consegue atenuar toda a onda que se propaga para trás. Assim, há a necessidade de se aumentar o tamanho do backing.

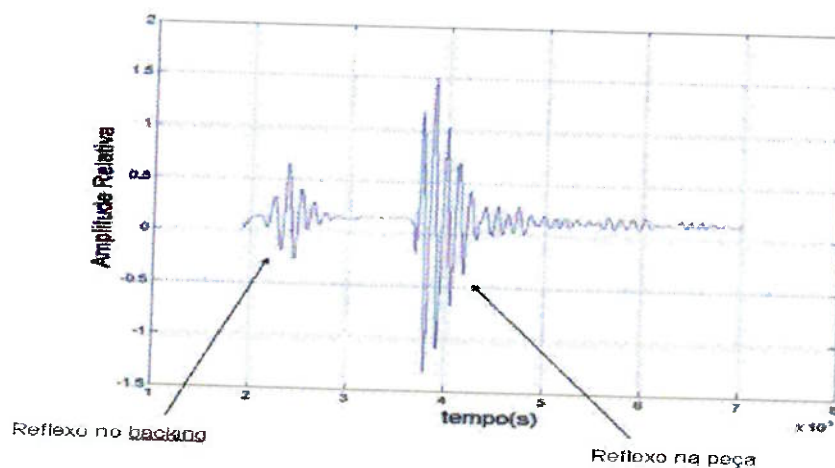


Figura 5.7 – Campo acústico à distância de 26,3 mm centralizado ao array

O processo a ser utilizado e as características do sinal é descrito a seguir:

- Nos arquivos dos dados há um vetor com as tensões elétricas em função do tempo;

- As amplitudes maiores são devido às reflexões, portanto é possível calcular a posição de uma falha ou objeto através da composição dos sinais;
- Para compor os sinais verificam-se os valores da tensão relacionados com as posições de uma área em frente ao transdutor e monta-se uma matriz com esses valores;
- Com a plotagem da matriz é possível visualizar as posições onde houve maior reflexão da onda de ultra-som e assim detectar a presença de falhas;

6. Conclusões

Métodos numéricos de análise foram utilizados para avaliar o comportamento de arrays piezelétricos de ultra-som e caracterizá-los para posterior dimensionamento de um protótipo. O método numérico utilizado foi o método dos elementos finitos (MEF) que permite verificar a influência dos atrasos impostos nas excitações elétricas em cada elemento do array. Foi mostrado que, tanto realizando a simulação no ANSYS quanto no Matlab, os resultados são semelhantes.

A análise transiente estuda o comportamento do transdutor excitado por ondas senoidais, permitindo a visualização da propagação das ondas no tempo e mostrando o comportamento delas no meio em que ela é propagada.

Através dos resultados obtidos, verificou-se que o array consegue uma definição de imagem através do modo B, apesar de estar sem a camada de matching a qual faz o casamento da impedância acústica entre o meio externo e a cerâmica. O modelo teórico utilizado, de acordo com os resultados obtidos, pode ser usado para modelar um array linear piezelétrico de ultra-som com boa aproximação.

Referências Bibliográficas

- J.H. Lee and S.W. Choi, "A Parametric Study of Ultrasonic Beam Profiles for a Linear Phased Array Transducer", IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 47, no. 3, 2000.
- Akhnak, M., "Arrays Piezoeléctricos Bidimensionales de Apertura Segmentada para la Obtención de Imagem Acústica Volumétrica", Departamento de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas, Instituto de Acústica, Madrid, 2002.
- Simon, C., "Técnicas de Processamento Digital de Sinais Aplicadas a Ensaios Não Destrutivos por Ultra-Som", Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, São Paulo, 1993.
- Fritsch C., "Técnicas Electrónicas de Focalización de Haces Ultrasónicas", Instituto de Automática Industrial (CSIC), La Poveda (Arganda) 28500 Madrid, 2001.
- Alvear, L. G. U. (1); Graullera, O. M. (1); Godoy, G. (2), "Descripción del haz ultrasónico generado por arrays de transductores", (1) Instituto de Automática Industrial (CSIC) La Poveda, 28500 Arganda (Madrid), (2) Dep. Eletrónica, Universidad de Jaén.
- Silva, E. C. N. "Modelagem Vibracional de Transdutores de Ultra-Som Piezoeléctricos pelo Método de Elementos Finitos", Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, São Paulo, 1993.
- Shung K. K., "Ultrasonic Transducers and Arrays", The Pennsylvania State University, University Park, IEEE Engineering in Medicine and Biology, 1996.