

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FLÁVIO MORAL TURIBIO FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO
MATRICIAL BIDIMENSIONAL PARA FORMAÇÃO DE IMAGEM**

São Paulo
2017

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FLÁVIO MORAL TURIBIO FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO
MATRICIAL BIDIMENSIONAL PARA FORMAÇÃO DE IMAGEM**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecatrônica

São Paulo
2017

FLÁVIO MORAL TURIBIO FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTOR ULTRASSÔNICO
MATRICIAL BIDIMENSIONAL PARA FORMAÇÃO DE IMAGEM**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecatrônica

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Flávio Buiochi

São Paulo
2017

RESUMO

O projeto consiste no desenvolvimento de um transdutor piezelétrico matricial bidimensional com frequência de operação de 1 MHz para aplicações em ensaios não destrutivos por ultrassom. Foram propostos métodos de projeto e fabricação desse transdutor array, considerando-se acoplamento direto em acrílico, geração de pulsos ultrassônicos curtos e recepção de sinais acústicos com alta sensibilidade. O protótipo fabricado foi caracterizado por meio da medição da largura de banda de cada elemento do transdutor e da duração dos pulsos gerados.

Palavras-chave: Ultrassonografia, ensaios não destrutivos, imagens por ultrassom.

ABSTRACT

The project consists on the development of a two-dimensional piezoelectric transducer with a frequency of operation of 1 MHz for applications in nondestructive testing by ultrasound. Methods of design and manufacturing of this transducer array were proposed, considering direct coupling in acrylic, generation of short ultrasonic pulses and reception of acoustic signals with high sensitivity. The fabricated prototype was characterized by measuring the bandwidth of each transducer element and the duration of the pulses generated.

Keywords: Ultrasonography, nondestructive testing, ultrasound imaging.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Introdução | 7 |
| 1.1 | Transdutor ultrassônico | 7 |
| 1.1.1 | Transdutor Monoelemento | 7 |
| 1.1.2 | Transdutores Matriciais | 9 |
| 1.2 | Referências Bibliográficas | 10 |
| 1.3 | Objetivo | 11 |
| 1.4 | Motivação | 12 |
| 2. | Fundamentos Teóricos | 12 |
| 2.1 | Efeito Piezelétrico | 12 |
| 2.2 | Transdutores ultrassônicos piezelétricos | 13 |
| 2.3 | Conceitos de Acústica | 15 |
| 2.4 | Cross-Talk | 16 |
| 2.5 | Formação de imagem | 16 |
| 3. | Definição do Projeto | 19 |
| 4. | Fabricação | 20 |
| 6. | Caracterização | 26 |
| 7. | Conclusão | 30 |
| 8. | Referências Bibliográficas | 30 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Transdutor monoelemento | 8 |
| Figura 2 - Transdutores matriciais..... | 9 |
| Figura 3 - Efeito piezelétrico aplicado em cerâmica | 12 |
| Figura 4 – Representação de transdutor linear | 14 |
| Figura 5 - Representação do efeito da aplicação de atrasos | 14 |
| Figura 6 - Representação de transdutor matricial | 15 |
| Figura 7 - Exemplo de gráfico A-scan | 16 |
| Figura 8 - Caminho percorrido do elemento emissor , em X_E , ao receptor, em X_R ... | 17 |
| Figura 9 - Abertura efetiva para imagem por SAFT..... | 18 |
| Figura 10 - Abertura efetiva para imagem por STA..... | 18 |
| Figura 11 – Representação da distribuição de cada elemento no transdutor array .. | 20 |
| Figura 12 – Cerâmica após o corte | 20 |
| Figura 13 – Transdutor após aplicação da solda..... | 21 |
| Figura 14 – Transdutor com cabos soldados | 22 |
| Figura 15 – Transdutor com primeira camada de backing | 22 |
| Figura 16 – Cabos blindados por papel alumínio (a) e Teflon (b)..... | 23 |
| Figura 17 – Transdutor encapsulado..... | 23 |
| Figura 18 – Placa inserida no conector | 24 |
| Figura 19 – Vista lateral do conector..... | 24 |
| Figura 20 – Preenchimento da camada de backing e carcaça fechada com detalhe do furo para inserção da resina epóxi e terra soldado na carcaça | 25 |
| Figura 21 – Preenchimento da camada de acoplamento | 25 |
| Figura 22 – Transdutor finalizado..... | 26 |
| Figura 23 - Curva de impedância do elemento 41..... | 26 |
| Figura 24 - Teste realizado no Laboratório de Ultrassom | 27 |
| Figura 25 - Gráfico com pulso refletido (a) e transformada de Fourier do sinal (b) ... | 27 |

1. Introdução

1.1 Transdutor ultrassônico

Na indústria mecânica, a inspeção ultrassônica constitui uma ferramenta indispensável para a detecção de falhas ou descontinuidades estruturais internas, verificando espessuras, qualidade de solda e, sobretudo, garantindo a integridade das peças (Andreucci, 2003). Os ensaios não destrutivos por ultrassom visam diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças, tanto em processos de fabricação, como em inspeções em estruturas mecânicas.

Transdutor ultrassônico é um dispositivo eletromecânico que converte energia elétrica em energia acústica e vice-versa. O elemento ativo da maioria dos transdutores ultrassônicos consiste de um elemento piezelétrico inserido entre as camadas de acoplamento e de retaguarda. A camada de acoplamento assume as funções de acoplamento acústico com o meio externo e de proteção da superfície da cerâmica e seu eletrodo. A camada de retaguarda tem a função de determinar que tipo de amortecimento a ser aplicado ao elemento piezelétrico conforme o tipo do transdutor e regime de operação desejado (contínuo ou onda pulsado). Ao se aplicar um sinal elétrico senoidal ao material piezelétrico ele vibra e gera ondas mecânicas de mesma frequência que o sinal elétrico aplicado. Similarmente, se for aplicada uma excitação por vibração mecânica, será gerado um sinal elétrico, cuja frequência é igual à de excitação. (Sánchez, 2003)

1.1.1 Transdutor Monoelemento

O transdutor monoelemento é o tipo mais simples de transdutor de ultrassom utilizado. Na Fig. 1 está uma representação esquemática com as partes mais importantes deste tipo de transdutor.

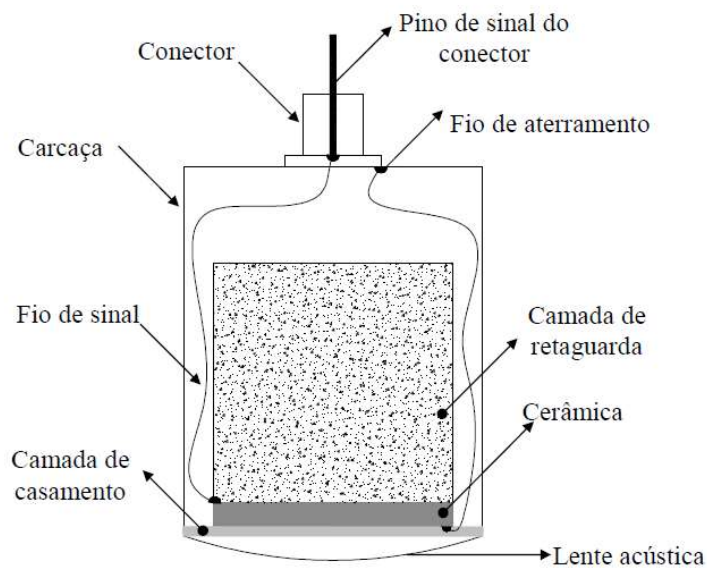


Figura 1 - Transdutor monoelemento

A cerâmica piezelétrica da Figura 1 possui as faces recobertas com uma camada muito fina de material condutor, geralmente formada pela deposição de prata ou ouro, formando os eletrodos de cobertura da cerâmica. Dois terminais, um de sinal e outro de terra são ligados nos eletrodos da cerâmica. Os eletrodos são os responsáveis pela excitação da cerâmica, tanto na emissão dos sinais de ultrassom como na recepção dos ecos refletidos.

Uma camada de retaguarda com impedância acústica próxima à da cerâmica é adicionada na face do eletrodo de sinal da cerâmica para casar as impedâncias acústicas entre esses materiais e ajudar na atenuação das ondas que se propagam para trás, onde se espera que elas sejam amortecidas até um patamar onde não interfira nos sinais propagados no meio. Essa perda mecânica amortece o pulso emitido diminuindo sua duração (número de oscilações) tornando-o mais estreito. Um pulso mais estreito com menor duração ajuda a aumentar a largura de banda em frequência do transdutor, o que é vantajoso em aplicações pulso-eco na geração de imagens, pois aumenta sensivelmente a resoluções axial e longitudinal da imagem pelo aumento da frequência de amostragem empregada. No entanto, essas perdas também diminuem a quantidade de energia acústica transmitida no meio (sensibilidade). Consequentemente, a profundidade de penetração do ultrassom no meio inspecionado diminui também.

Para se obter o máximo de energia na transmissão do ultrassom da cerâmica para o meio, uma camada de casamento de impedância é colocada na face do eletrodo de terra da cerâmica. Além de casar a impedância da cerâmica com a impedância do meio de propagação, essa camada frontal forma a face externa do transdutor que serve de proteção. A espessura ótima para esse casamento de impedância é obtida pelo dimensionamento da camada de modo que sua espessura atinja $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda desejado. Para transdutores de contato, a camada

de casamento é feita de um material que tem uma impedância acústica igual a média geométrica entre as impedâncias acústicas da cerâmica e do material do meio de propagação, e no caso transdutores de imersão, a média geométrica é entre a cerâmica e a água.

Alguns transdutores possuem adicionalmente uma lente acústica para ajudar na focalização do feixe acústico. Para finalizar, o transdutor da Fig. 1 recebe uma carcaça de metal ou de plástico para a isolamento elétrico e a proteção mecânica de todo o sistema (Papadakis et al., 1999), (Shung; Zipparo, 1996) e (Gallego-Juarez, 1989).

1.1.2 Transdutores Matriciais

O desenvolvimento da eletrônica e da informática propiciou a evolução dos transdutores levando ao surgimento dos transdutores matriciais (Whittingham, 1997). Estes, transdutores são constituídos de mais de um elemento piezelétrico e de acordo com seu arranjo podem ser de uma dimensão (1D), duas dimensões (2D) e anulares (Shung e Zipparo, 1996).

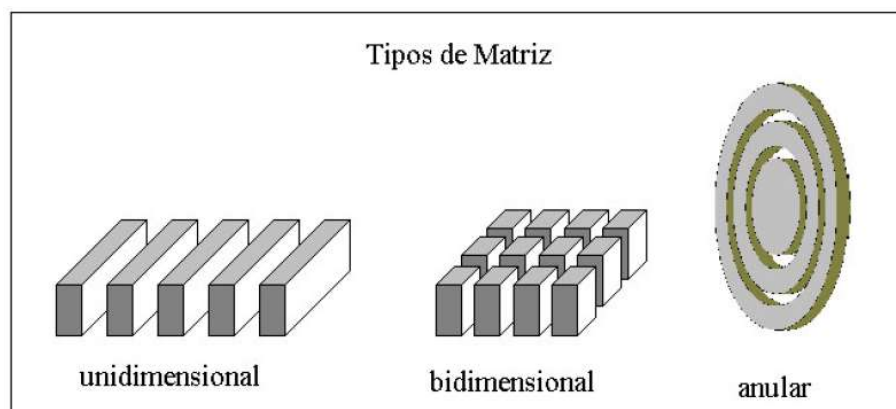


Figura 2 - Transdutores matriciais

Todos os aspectos constitutivos do monoelemento da Fig. 2 servem para descrever o princípio de funcionamento do elemento individual que compões a sequência de elementos de um transdutor multielemento. Os transdutores matriciais são muito mais versáteis que os transdutores de um só elemento. Dentre suas vantagens pode-se citar que com eles é possível controlar a focalização e direção do feixe ultrassônico (Turnbull e Foster, 1992). Entretanto possuem a dificuldade de serem mais complexos, caros e exigirem uma eletrônica de operação muito mais complexa.

Cada elemento da sequência deve ser independente e capaz de gerar uma forma de onda arbitrária e de receber os sinais dos ecos refletidos pelo alvo a ser investigado (Drinkwater; Wilcox, 2006). Sendo assim, o sinal gerado e recebido pelo *array* é a soma das contribuições de cada elemento da sequência, que deve ser

tratado como um transdutor monoelemento separadamente. Todos os elementos do transdutor devem ter o mesmo padrão para que o sinal da sequência seja homogêneo. Com relação ao transdutor monoelemento, o multielemento é capaz de realizar varreduras sem a necessidade de se movimentar mecanicamente o transdutor por meio de dispositivos.

1.2 Referências Bibliográficas

Diversos artigos já foram elaborados sobre transdutores arrays ultrassônicos, sendo descritos métodos de construção, incluindo o número e a distribuição de elementos, e também modos de aplicação, de acordo com as áreas de aplicação (médica e industrial).

Dois artigos que tratam da construção de transdutores array lineares são o de Buiochi et al. (2012) e o de Namindome (2010). O primeiro é voltado para a aplicação médica e possui 24 elementos operando na frequência de 2,25 MHz construído com cerâmica piezelétrica de zirconato titanato de chumbo (PZT) do tipo Pz37. São demonstrados as etapas de construção do array e o protótipo caracterizado, medindo os sinais emitidos por cada elemento através de um hidrofone. O segundo é um projeto similar, porém com uma descrição mais detalhada das etapas de fabricação dos transdutores. São discutidas as dificuldades encontradas na fabricação, como a complexidade de se manusear fios extremamente finos (diâmetro da ordem de 90 μm) e a importância de se eliminar as bolhas na mistura de epóxi. Visto que a presença de bolhas no matching aumenta a atenuação das ondas nesse meio, diminuindo a transmissão de energia para o meio externo.

Uma abordagem diferente foi tomada por Belassiano (2004), que optou pela fabricação de um transdutor ultrassônico matricial de duas dimensões com 9 elementos (3 por 3). A aplicação desse transdutor é para monitorar o fluxo sanguíneo cerebral a longo prazo.

Há ainda o trabalho proposto por Oliveira (2015), que desenvolveu um transdutor flexível capaz de acoplar diretamente em superfícies curvas de peças mecânicas ou do corpo humano. Foram utilizadas técnicas de resistência dos materiais e extensometria para fabricar as camadas de matching e backing, flexíveis e resistentes, embebidos nos elementos piezelétricos do transdutor flexível de ultrassom.

O estudo do cross-talk foi aprofundado pelo trabalho de Domínguez (2003). O cross-talk é um efeito prejudicial ao sistema e tem sua origem tanto mecânica quanto elétrica. A primeira ocorre por causa da vibração do elemento adjacente, que

interfere na excitação dos demais elementos do array, gerando a intensificação da difração e redução da capacidade de direcionamento do feixe acústico, tanto na recepção como na transmissão. Já o cross-talk elétrico é causado por deficiência na blindagem magnética ou por efeito capacitivo entre elementos e possui consequências similares ao sistema.

Guess et al. (1995) construíram um transdutor matricial linear, medindo o cross-talk a cada passo. O instrumento apresentava frequência central de 3MHz com largura de banda (-6dB) de 1,8 a 4MHz, passo de 0,82mm, o que corresponde a aproximadamente 1,6 comprimentos de onda a 3MHz nos tecidos. Os elementos, feitos com uma cerâmica piezoelétrica similar à PZT-5H, foram subdivididos uma vez, com *kerf* (canaletas relativas aos cortes nos elementos) de 0,13mm, se estendendo 0,02 a 0,04mm na camada de retaguarda. Resultados demonstraram cross-talk através da camada de retaguarda e preenchimento entre os elementos a cada nível de construção. As submatrizes foram testadas somente com a cerâmica preenchida, com uma camada de acoplamento e com duas camadas de acoplamento. Mediu-se o efeito do preenchedor dos *kerfs* em todos os casos. Os modos de vibração cujo deslocamento são principalmente laterais contribuem bastante para o cross-talk, especialmente se o *kerf* for preenchido.

Turnbull & Foster (1992) descreveram a construção de um transdutor matricial bidimensional para imagem, de frequência entre 4 e 5MHz. Cortou-se a cerâmica PZT-5A com uma serra de 45µm. Obtiveram-se elementos de 100µm por 100µm e passo (distância do centro de um elemento até o centro do elemento contíguo) de 150µm. Preencheram-se os *kerfs* com epóxi. Lixaram-se os elementos até a espessura de 420µm, o que acarretou a desmetalização de um dos lados. Assim, colocou-se um eletrodo de Cr-Au em comum para todos os elementos.

O projeto desenvolvido por Matuda (2014) apresentou conceitos fundamentais para a formação de imagens através de transdutores ultrassônicos que serviram como base para este projeto. O trabalho considerado como principal base para este projeto foi realizado por Akhnak (2002). Akhnak desenvolveu um transdutor ultrassônico bidimensional com elementos formando anéis circulares, com o intuito de diminuir o número de elementos sem afetar a resolução da imagem gerada.

1.3 Objetivo

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de transdutor de ultrassom matricial bidimensional para formação de imagens. O transdutor foi desenvolvido visando aplicação em ensaios não destrutivos por ultrassom, com o intuito de realizar a inspeção de peças de acrílico através de acoplamento acústico por contato direto com o objeto.

1.4 Motivação

A principal motivação por trás deste projeto é o fato de transdutores bidimensionais serem uma tecnologia recente, principalmente no Brasil, onde no momento não há modelos fabricados comercialmente, apenas como pesquisa em universidades.

Além disso, o transdutor matricial bidimensional é visto na literatura como impraticável com o nível da tecnologia de hoje, devido à grande quantidade de elementos necessários e a dificuldade de processamento de sinais (Akhnak, 2002).

2. Fundamentos Teóricos

2.1 Efeito Piezelétrico

O efeito piezelétrico é um fenômeno natural observado em alguns materiais anisotrópicos abaixo de uma determinada temperatura, a temperatura de Curie, acima da qual as substâncias perdem o seu comportamento ferromagnético. Nestes materiais, a simetria da distribuição das cargas elétricas internas pode ser perdida em resposta a uma tensão mecânica (tração ou compressão), sendo produzido um campo elétrico na direção da assimetria. O efeito inverso também ocorre, ou seja, uma assimetria na distribuição das cargas elétricas é causada pela aplicação de um campo elétrico externo, gerando uma deformação do material. Este efeito está exemplificado na figura 3.

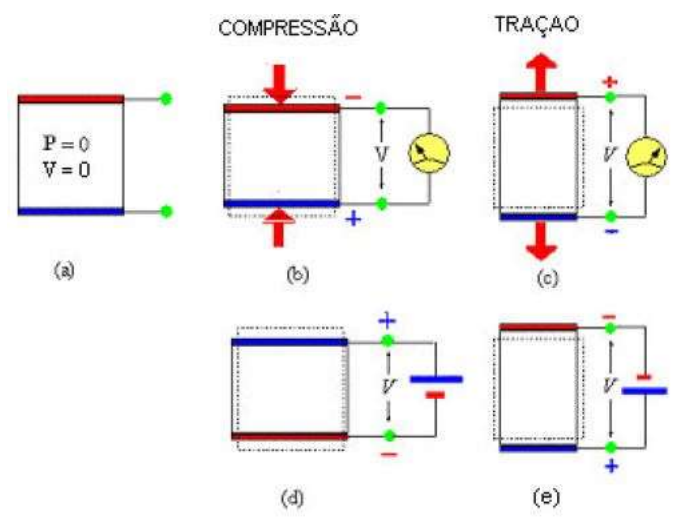


Figura 3 - Efeito piezelétrico aplicado em cerâmica

Na Figura 3 podemos observar: a) cerâmica piezelétrica em repouso, (b) e (c) aplicação de uma pressão na cerâmica e a consequente geração de uma diferença de potencial (ddp) entre seus eletrodos. (d) e (e) As deformações produzidas no elemento piezelétrico pela aplicação de ddp positiva ou negativa (Sánchez,2003).

Este efeito ocorre de forma natural em alguns materiais, como o quartzo, o sulfato de lítio, a turmalina, entre outros, porém de forma fraca. Já as cerâmicas ferroelétricas policristalinas, como o titanato zirconato de chumbo polarizado (PZT), que são fabricadas e polarizadas, apresentam um forte efeito piezelétrico. Assim, desde a descoberta das cerâmicas PZTs, elas passaram a ser as mais utilizadas como elementos piezelétricos. Dentre os diferentes tipos de cerâmicas PZT estão (MORGAN MATROC LIMITED):

- PZT-4 (Tipo I, Naval) - Este material é ideal para limpeza ultrassônica, sonar outras aplicações acústicas de radiação de potência elevada.
- PZT-4D.- Empregado em aplicações de motores, que requerem níveis de potência elevada e sensibilidade elevada.
- PZT-8 (Tipo III, Naval) - Usado para aplicações de potência elevada, com uma qualidade mecânica elevada e um fator de perda extremamente baixo.
- PZT-5A (Tipo II, Naval) - Usado em hidrofones, acelerômetros e coletores de vibração
- PZT-5J (Tipo VI, Naval) - Usado em fusíveis, hidrofones, e outras aplicações que precisam uma combinação de energia elevada e alta voltagem na saída.
- PZT-5R.- Empregado em aplicações de linhas de array.
- PZT-7A.- Usado em linhas de atraso ultrassônicas e outras aplicações de alta frequência de ressonância.
- PZT-7D.- Usado em aplicações que precisam de potência elevada na manipulação capacitiva.
- PZT 23/27.- As aplicações típicas desta cerâmica são em sensores de pressão, acelerômetros, medidores de fluxo, em sistemas de testes não destrutivos e principalmente em transdutores de ultrassom.
- PZT 24/26.- Estes materiais são extensamente usados em aplicações de alta voltagem, fusíveis, dispositivos de ignição “ flash”, aplicações em ultrassom de potência, processamento de materiais.
- PZT 29.- Usada em receptores, acelerômetros, dispositivos de sensibilidade, instrumentos eletrônicos musicais, transmissores de baixa potência.
- PZT 32/34.- Usada em diagnósticos médicos, arranjos de alta frequência, sistemas para testes não destrutivos.
- PZT 45.- Particularmente apropriadas para aplicações em ambientes que requerem estabilidade na temperatura, e também uma excelente resposta da temperatura.

2.2 Transdutores ultrassônicos piezelétricos

O funcionamento básico de um transdutor monoelemento consiste na aplicação de um sinal elétrico entre as faces da cerâmica piezelétrica, causando

uma vibração do material na mesma frequência do sinal de entrada. Isto gera um campo de pressão variável, que se propaga na forma de onda acústica, podendo ser refletida por algum defeito ou descontinuidade no material. Esta onda retorna ao transdutor, vibrando-o e gerando um sinal elétrico que é enviado ao computador.

Os elementos piezelétricos podem estar dispostos em um arranjo linear (*linear array*), conforme mostra a figura 4. Assim, é possível produzir atrasos de acionamento de cada elemento, resultando numa focalização e deflexão do feixe acústico no plano azimutal (figura 5). Com o acionamento eletrônico dos elementos de um array linear, é possível gerar uma imagem no plano azimutal. Para gerar imagens tridimensionais é necessário mover mecanicamente o transdutor linear na direção perpendicular ao plano azimutal.

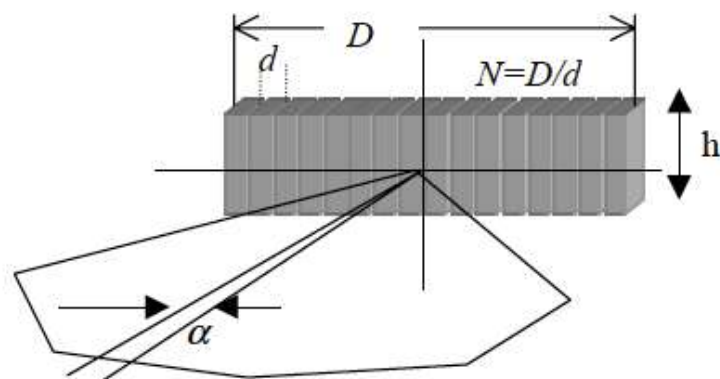


Figura 4 – Representação de transdutor linear

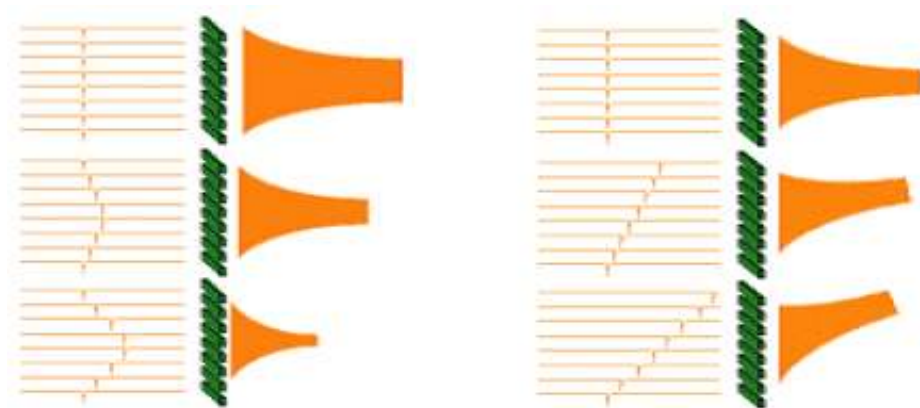


Figura 5 - Representação do efeito da aplicação de atrasos

Um array matricial bidimensional é uma extensão do array linear. O feixe ultrassônico é capaz de defletir e realizar a varredura em um espaço tridimensional,

conforme demonstra a figura 6. Sua limitação atual resulta do encarecimento da fabricação e processamento da eletrônica de excitação para estes transdutores.

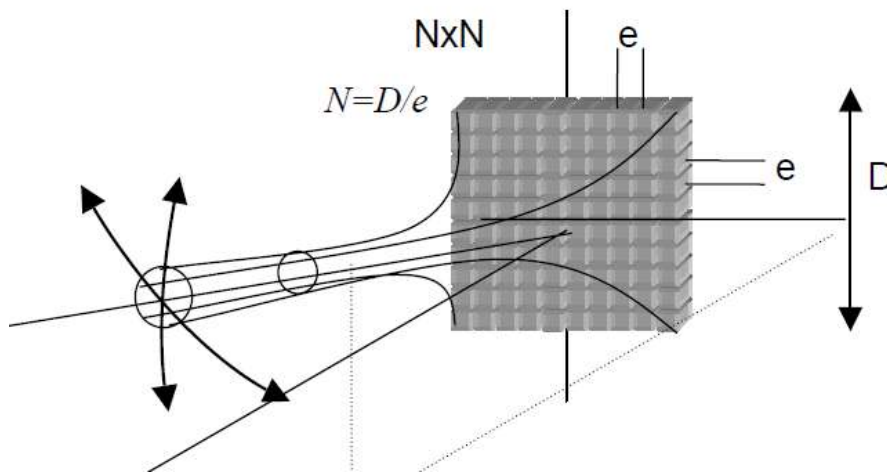


Figura 6 - Representação de transdutor matricial

2.3 Conceitos de Acústica

A velocidade de propagação de uma onda é dada por:

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

Sendo λ o comprimento de onda e f a frequência de oscilação. A partir da eq. (2.1), conhecendo-se a velocidade de propagação c no meio e a frequência de operação desejada do transdutor, o tamanho de cada elemento e a espessura da cerâmica são definidos. Além disto, é importante ressaltar que uma descontinuidade será detectada pelo transdutor somente se ele for da ordem de grandeza de $\lambda/2$, no mínimo. Podemos perceber que quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda e, portanto, menor os defeitos possíveis de serem detectados.

Outra propriedade importante é a impedância acústica (Z), definida como o produto da densidade do meio (ρ) pela velocidade de propagação da onda (c), dada por:

$$Z = \rho \cdot c \quad (2.2)$$

Quanto maior a diferença de impedância acústica mais difícil será a transmissão de um meio para outro. Dada a grande diferença de impedância acústica entre o transdutor e o ar, é comum o uso de uma camada acoplante (líquido ou gel) entre o transdutor e o meio a ser analisado para que a energia não seja dissipada na interface entre os dois meios.

A camada de retaguarda (backing) deve ter uma impedância acústica próxima à da cerâmica para garantir um bom acoplamento, e com atenuação alta para eliminar as reflexões, dando uma característica de transdutor de banda larga.

2.4 Cross-Talk

O cross-talk é um efeito indesejável que ocorre em transdutores piezelétricos. Ao se excitar um elemento específico é possível que provoque vibrações em outros elementos adjacentes, reduzindo a capacidade de direcionamento do feixe tanto na transmissão como na recepção.

O cross-talk pode ser de natureza elétrica ou mecânica. É sempre função da proximidade entre os elementos piezelétricos do transdutor ou entre as conexões dos mesmos. Pode ser provocado por uma série de fatores, tais como: deficiência na blindagem eletromagnética entre os elementos, efeito capacitivo entre os elementos ou suas conexões elétricas, transmissão da conversão de modos de vibração a elementos adjacentes devido ao isolamento mecânico insuficiente (Sánchez, 2003).

2.5 Formação de imagem

No processo de formação de imagem usando transdutor array ultrassônico, primeiro o equipamento de aquisição excita eletricamente os elementos transmissores com uma lei de atraso, focalizando e defletindo as ondas acústicas numa dada direção. Depois essas ondas propagam-se e sofrem reflexão quando há diferença de impedâncias acústicas (Kino, 2000). Os sinais recebidos por cada um dos elementos do array podem ser representados no modo A (A-scan), como mostra a figura 7.

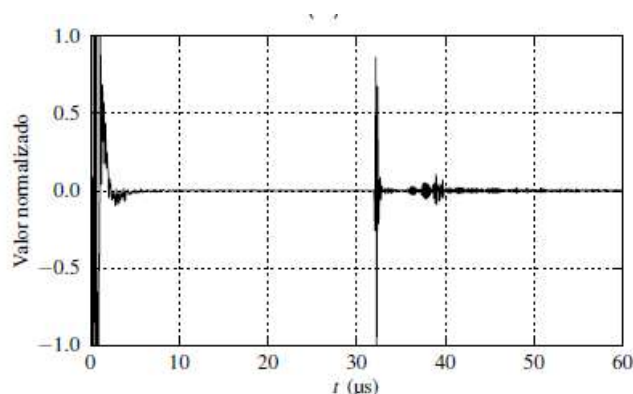


Figura 7 - Exemplo de gráfico A-scan

Na formação de imagem é necessário definir uma grade, cujos nós estão localizados no campo ao redor do transdutor. Para cada ponto na grade, calcula-se o tempo t_{eco} em que deve aparecer um eco, caso haja um refletor neste ponto. Para isto, deve-se obter o caminho percorrido pela onda, considerado retilíneo (Figura 8). O tempo pode então ser calculado como $t_{eco} = (r_e + r_r)/c$, sendo r_e a distância percorrida do emissor ao ponto na grade, r_r a distância do ponto ao receptor e c a velocidade de propagação da onda no meio. O valor da amplitude do sinal no modo A-scan do tempo t_{eco} é acumulado na respectiva posição na grade. Desta forma, os ecos no A-scan são mapeados para pontos na grade que representam prováveis refletores (Matuda, 2014).

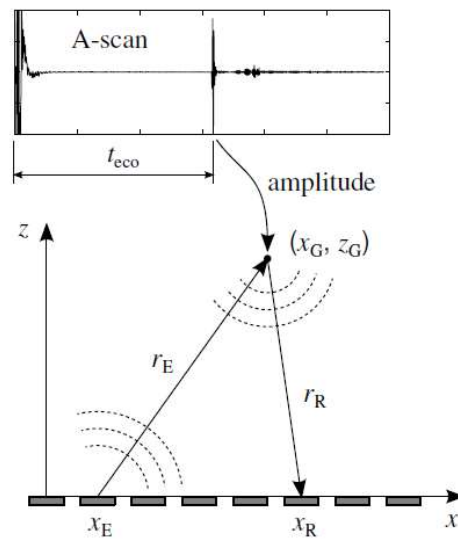


Figura 8 - Caminho percorrido do elemento emissor, em x_E , ao receptor, em x_R

Os principais métodos para a formação de imagem são:

- SAFT (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) – para a aquisição de sinal, apenas um elemento é o emissor e este mesmo elemento recebe o sinal. O mapeamento é feito para a grade inteira, que pode ter formato arbitrário, sendo formada uma imagem parcial a cada aquisição. Este método é chamado de abertura sintética, pois a área do transdutor é dividida em partes, cujos efeitos são combinados no resultado. Como as transmissões são armazenadas elemento a elemento, no processamento é possível definir atrasos para cada canal de forma independente, permitindo focar em qualquer ponto da imagem. Na Figura 9 pode ser vista a abertura efetiva para um array de 4 elementos (Matuda, 2014).

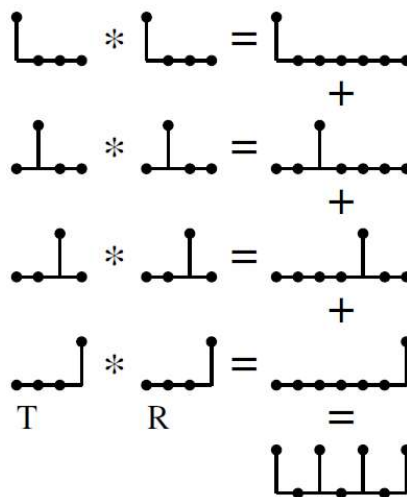


Figura 9 - Abertura efetiva para imagem por SAFT

- STA (*Synthetic Transmit Aperture*) – neste método, a área do transdutor é dividida apenas na transmissão, ou seja, um elemento transmite o sinal e todos os elementos do grupo recebem em cada aquisição. Se compararmos com o SAFT, o STA produz mais imagens parciais, uma para cada combinação de elemento transmissor e receptor, contribuindo para uma melhoria na relação sinal/ruído após o processamento. Na figura 10 há a demonstração desta técnica para um transdutor array de 4 elementos.

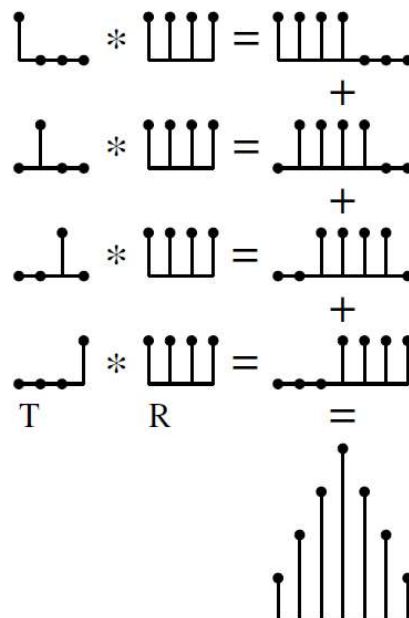


Figura 10 - Abertura efetiva para imagem por STA

3. Definição do Projeto

Diversos pontos foram levantados sobre os requisitos do projeto, entre eles o tipo de cerâmica, dimensionamento e distribuição de elementos.

O primeiro passo para definir o escopo do projeto é definir o meio em que o transdutor será acoplado. Baseando-se no projeto de Akhnak (2002), citado na seção de Referências Bibliográficas, o meio escolhido foi o acrílico, que possui um crescimento médio no mercado de chapas no Brasil de 10,7%, segundo o Instituto Nacional para o Desenvolvimento do Acrílico (Indac, 2014).

Com relação à cerâmica, foi escolhida a cerâmica Pz37, por ser mais porosa do que as demais cerâmicas e, portanto, mais indicada para aquisição de sinais de banda larga usados na formação de imagens. Além disso, essas cerâmicas estão disponíveis no laboratório de Ultrassom. A frequência de vibração da cerâmica escolhida é de 1MHz.

Sabendo que no acrílico o som possui velocidade de propagação de 2700 m/s. Da expressão (2.1), temos que $\lambda = 2,7 \text{ mm}$, para a frequência de 1MHz. Para se ter mais energia transmitida, a dimensão do elemento foi arredondada para 3mm. Para a frequência de operação de 1MHz, deve-se ressaltar que o defeito só é detectado caso seu tamanho seja maior do que $\lambda/2$. No caso, somente são detectados defeitos com ao menos 1,5 mm de dimensão.

A cerâmica foi cortada em 84 elementos de 9 mm² cada, distribuídos de forma quadrangular sem a presença de elementos no meio, como mostra a figura 11. A geometria retangular sem elementos no centro foi escolhida de forma que a distância focal do transdutor aumentasse com um número menor de elementos. A construção deste protótipo é detalhada na seção seguinte.

| | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| 31 | 32 | 33 | | | | | 34 | 35 | 36 |
| 37 | 38 | 39 | | | | | 40 | 41 | 42 |
| 43 | 44 | 45 | | | | | 46 | 47 | 48 |
| 49 | 50 | 51 | | | | | 52 | 53 | 54 |
| 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 |
| 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 |
| 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 |

Figura 11 – Representação da distribuição de cada elemento no transdutor array

4. Fabricação

As peças dimensionadas na seção anterior foram cortadas na máquina de corte DISCO DAD322. O resultado pode ser observado na figura 12:

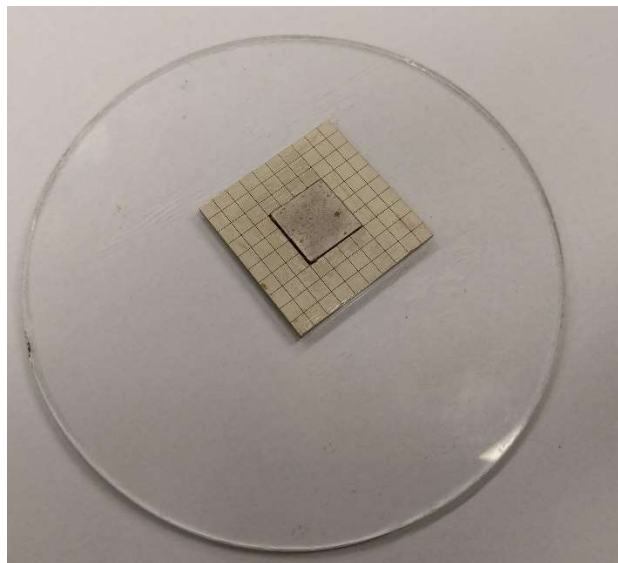


Figura 12 – Cerâmica após o corte

O corte foi não passante, ou seja, não atravessou totalmente a cerâmica, deixou-se uma camada de 0,03mm ($\pm 0,005$ mm é devido ao desnível do vidro da base) na base que serviu como o terra da cerâmica e para facilitar a manipulação do transdutor. O espaçamento entre os elementos foi de 0,01mm.

Posteriormente foi realizado o preenchimento do reticulado com mistura de resina de epóxi CY248 (concentração de 80% em massa) com endurecedor HY956 (20% em massa) após 15 minutos no vácuo. Essa mistura é aplicada em cima do protótipo e colocada no vácuo por 10 minutos para que entre na ranhura entre os elementos, eliminando a bolhas de ar. O excesso é retirado em seguida.

Além disso, foram construídas peças laterais para alinhar e prender os fios, facilitando o processo de soldagem dos cabos. Por fim, foi feito um depósito de solda em todos os elementos, com uma base de estanho, preparando a superfície para soldagem do cabo. A preparação da superfície antes de soldar os fios aos elementos garantiu uma melhor fixação do estanho nos poros da cerâmica e evitou um aquecimento demasiando local que poderia causar a despolarização da cerâmica. O resultado pode ser visualizado na figura 13.

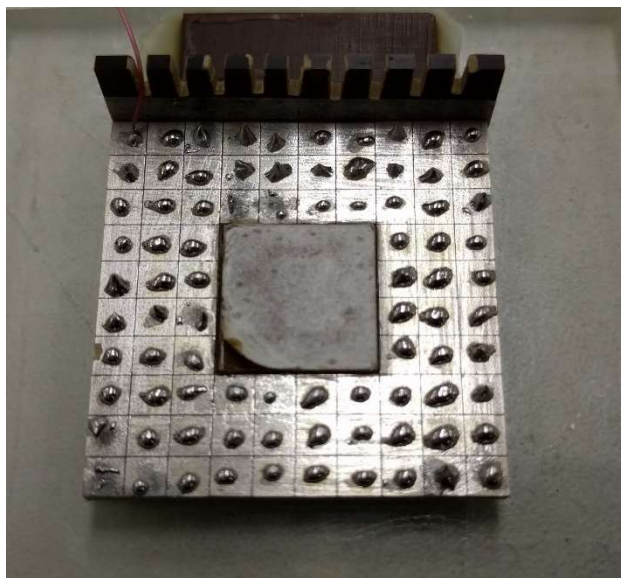


Figura 13 – Transdutor após aplicação da solda

Depois, foram soldados os cabos a cada um dos elementos do transdutor. Este processo consistiu em desencapar o cabo, separar o terra e desencapar a alma, que é então soldada ao elemento. Além disso, cada fio foi enumerado de 1 a 84 através de uma etiqueta para facilitar a identificação dos elementos posteriormente. Ao fim do processo, obtemos o seguinte resultado mostrado na figura 14.

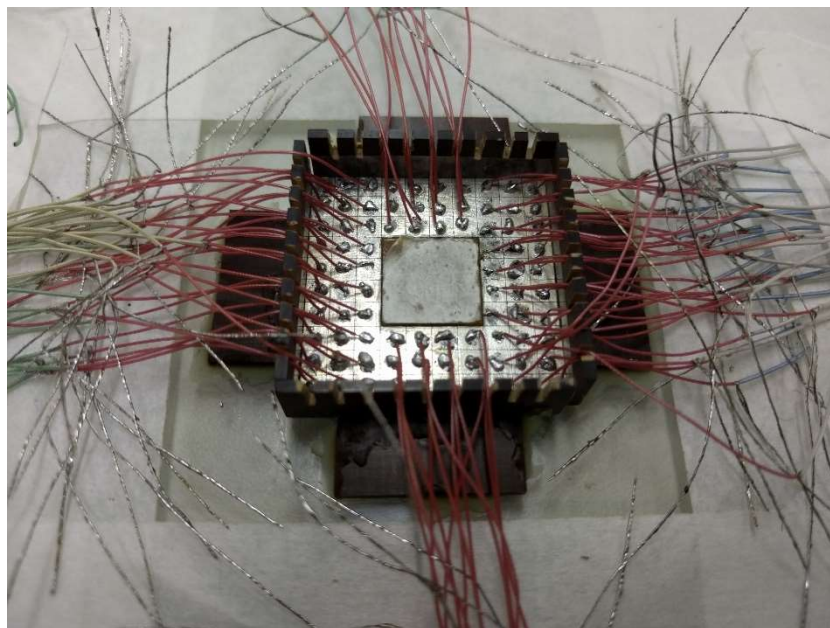


Figura 14 – Transdutor com cabos soldados

Em seguida, foi feita a primeira camada de backing, composta por 2g de epóxi, 1g de resina AW 106 da Huntsman e 1g de endurecedor HV 953 U BD, misturados à mão. Também foi acrescentado a essa mistura 13,4g de pó de tungstênio. O tempo total de trabalho foi de quinze minutos. Além disso, os fios terra foram agrupados e soldados. Resultado dessa etapa é apresentado na figura 15.

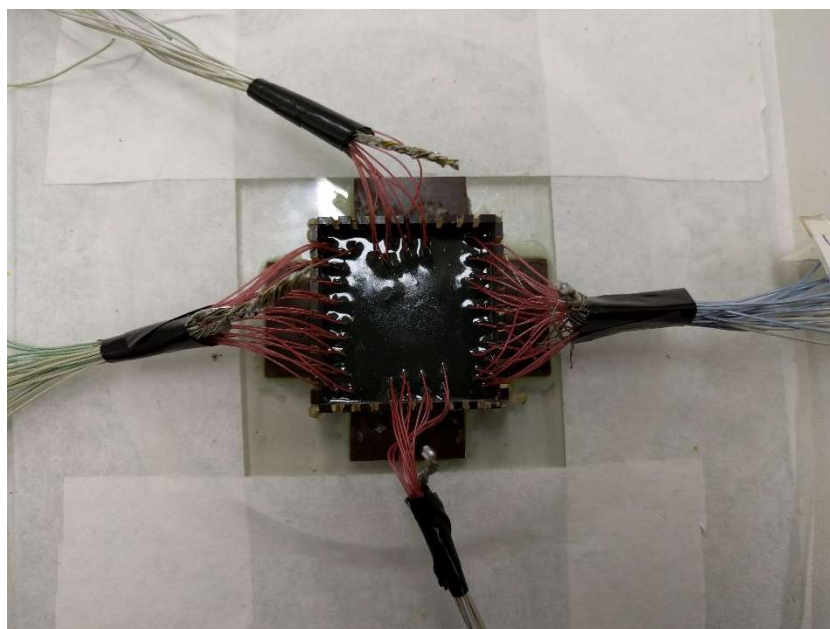


Figura 15 – Transdutor com primeira camada de backing

Subsequentemente, foi produzida a blindagem do cabo, sendo a primeira camada de papel alumínio e a segunda de Teflon, enrolados manualmente de forma helicoidal. A figura 16 apresenta o transdutor com o cabo finalizado.

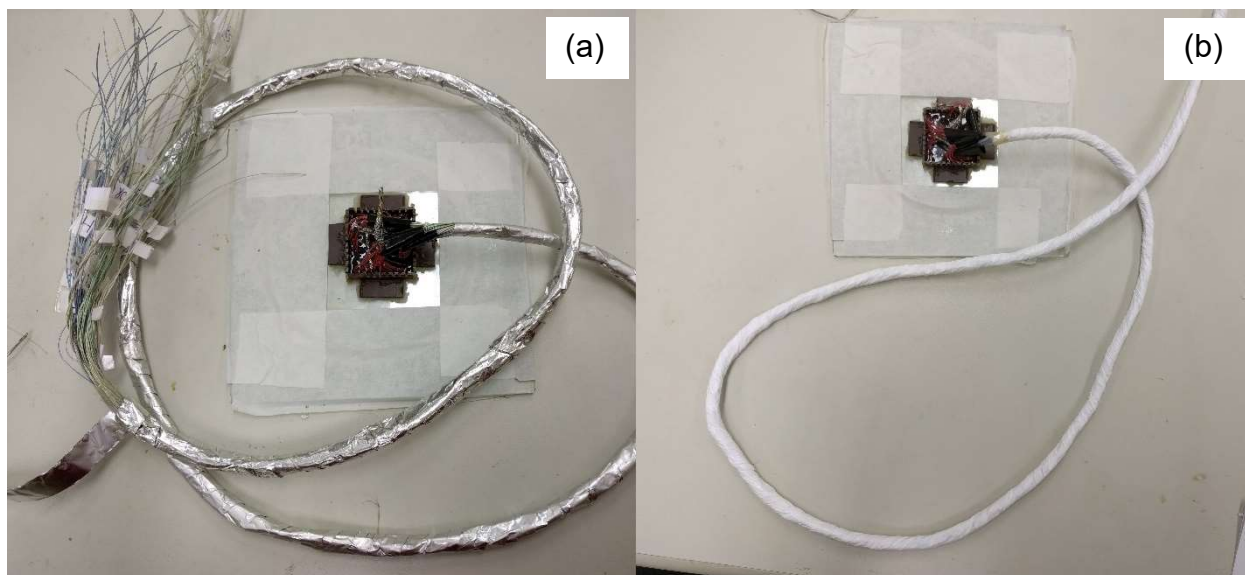


Figura 16 – Cabos blindados por papel alumínio (a) e Teflon (b)

Posteriormente, foi adicionada a segunda camada de backing, o prensa cabo e a carcaça do transdutor, conforme mostra a figura 17.

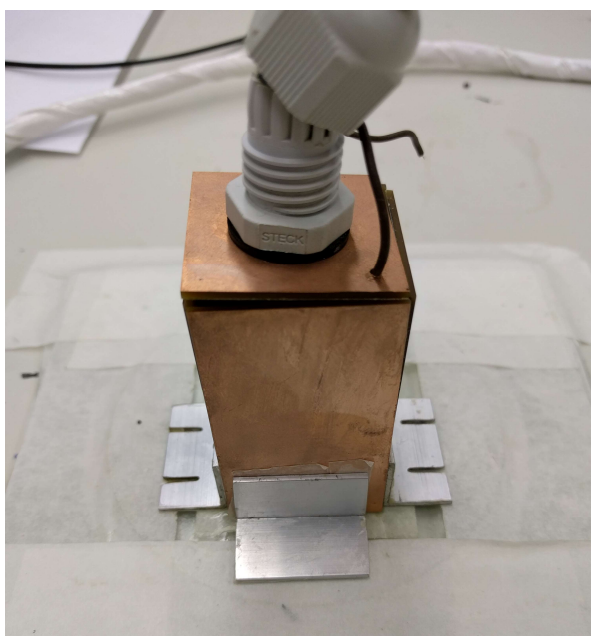


Figura 17 – Transdutor encapsulado

O passo seguinte foi a conexão dos cabos com o conector. Desmontou-se um conector multivias da marca Thomson Sintra de 160 pinos para ser conectado ao SITAU para a formação de imagem. A conexão dos fios de cada elemento foi feita ao conector por meio de 8 placas com 16 pinos de sinal e 4 pinos de terra cada. Neste projeto, foram utilizados 84 pinos de sinal. Cada fio conectado à cerâmica foi soldado no pino correspondente do conector, conforme mostra a figura 18.

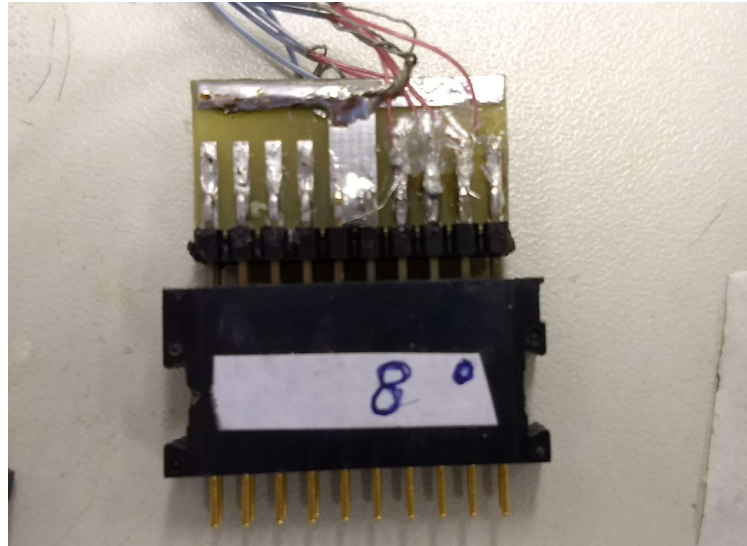


Figura 18 – Placa inserida no conector

Foi adicionada uma camada de cola quente para assegurar a fixação dos cabos na placa. As placas foram então inseridas no conector na ordem correta e ligadas por um fio terra passante (em azul na imagem), que foi conectado ao terra dos elementos.



Figura 19 – Vista lateral do conector

Em seguida foi inserida a última camada, composta de 20 gramas de araldite GY 279 e 2 gramas de aradur HY 951. Esta camada tem apenas a função de vedar o transdutor, uma vez que ele será submerso em água para a realização de testes. O preenchimento final foi feito através de um buraco na carcaça, como mostra a figura 20.



Figura 20 – Preenchimento da camada de backing e carcaça fechada com detalhe do furo para inserção da resina epóxi e terra soldado na carcaça

Por fim, foi adicionada a camada de acoplamento acústico, composta de 4 gramas de epóxi GY 279, 3,6 gramas de alumina e catalisador HY 951:

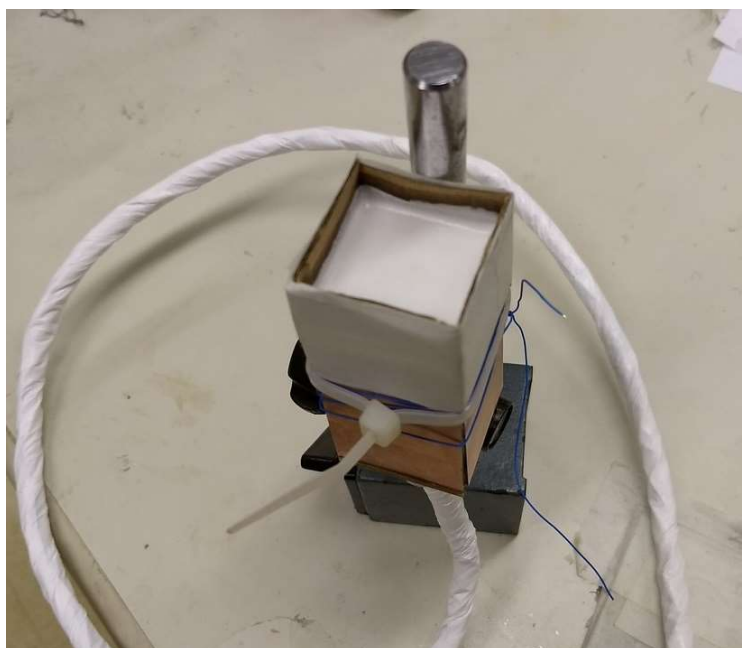


Figura 21 – Preenchimento da camada de acoplamento

O transdutor finalizado pode ser visualizado na figura 22. Adicionou-se mais uma camada de Teflon para proteção e impermeabilização dos cabos. Também foi feita inspeção de curtos-circuitos entre os pinos do conector, a fim de garantir o acionamento isolado de cada elemento.

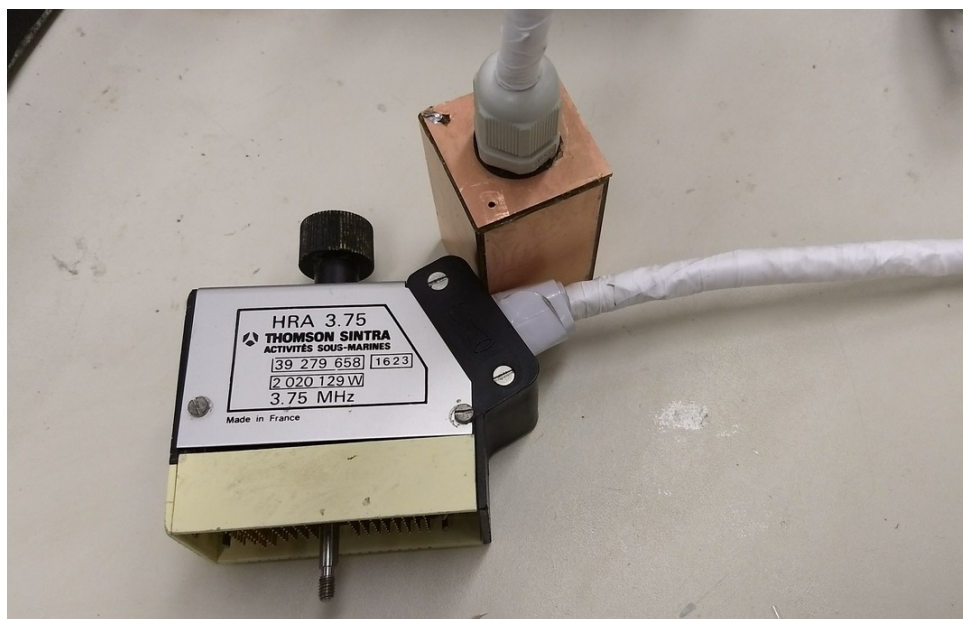


Figura 22 – Transdutor finalizado

6. Caracterização

A primeira etapa para o teste do transdutor consistiu na verificação elemento a elemento da curva de impedância através do impedômetro Agilent 4294A. A curva de impedância do elemento 41 pode ser vista na figura 23.

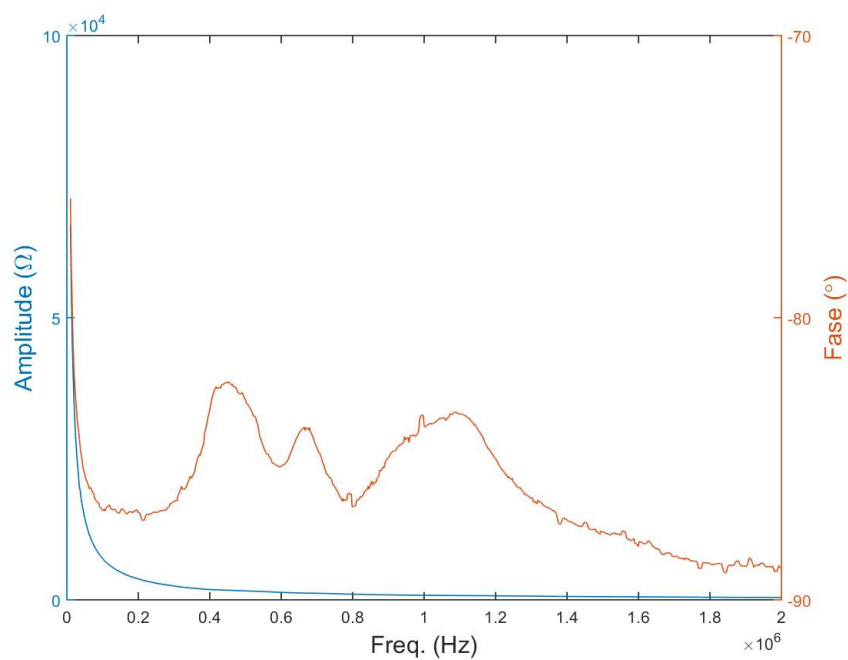


Figura 23 - Curva de impedância do elemento 41

Nesta verificação foi possível notar que alguns elementos não apresentavam a curva de impedância, provavelmente devido a alguma falha no processo de fabricação, como solda fria, que pode ocasionar mal contato com o decorrer do tempo. Os elementos defeituosos, seguindo a numeração da figura 11, são: 8, 19, 22, 38 e 50. Por representarem uma pequena fração do total de elementos, estas falhas não comprometeram a formação de imagens através da técnica de abertura sintética utilizada.

Em seguida, foi feita a caracterização através da medição do pulso de cada elemento individualmente. O experimento foi realizado num tanque contendo água, com o transdutor posicionado paralelamente a um bloco de metal com 56 mm de espessura a 106 mm de distância, conforme figura 24.

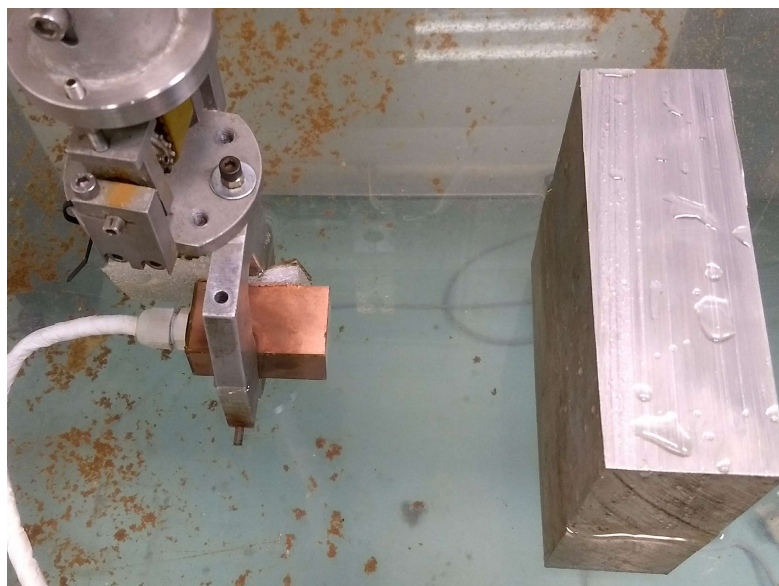


Figura 24 - Teste realizado no Laboratório de Ultrassom

Os dados obtidos pelo osciloscópio foram tratados posteriormente no software Matlab. A figura 25(a) demonstra o sinal em função do tempo para o pulso emitido pelo elemento 17. A figura 25(b) demonstra o resultado da transformada de Fourier do pulso.

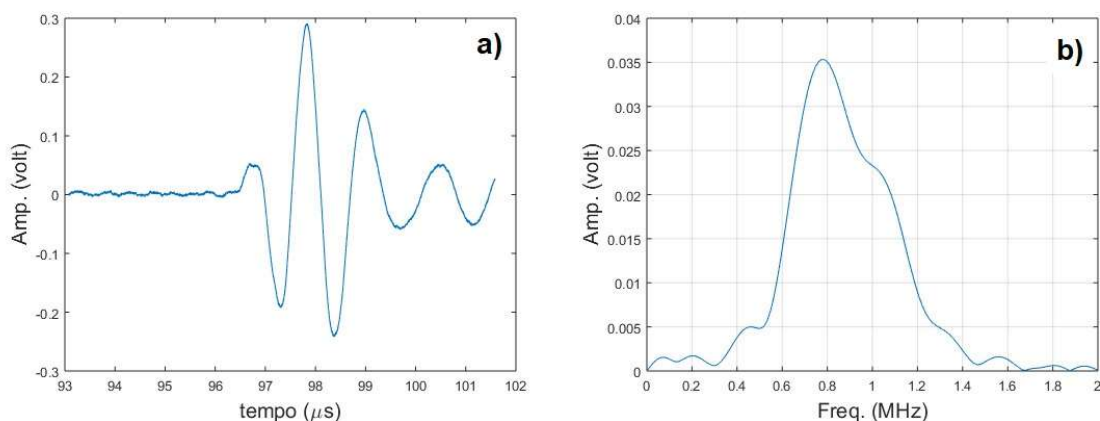


Figura 25 - Gráfico com pulso refletido (a) e transformada de Fourier do sinal (b)

Realizando-se o mesmo procedimento para todos os elementos, coletamos os principais parâmetros de cada elemento: tensão pico a pico (V_{pp}), frequência central de operação e largura de banda em porcentagem a -6dB. Os parâmetros medidos e calculados podem ser vistos na Tabela 1.

| Elemento | V_{pp} | Freq. (MHz) | Largura de banda | Elemento | V_{pp} | Freq. (MHz) | Largura de banda |
|----------|----------|-------------|------------------|----------|----------|-------------|------------------|
| 1 | 1,074 | 0,90 | 73% | 43 | 3,4604 | 0,84 | 46% |
| 2 | 1,0514 | 0,89 | 79% | 44 | 0,7661 | 0,98 | 48% |
| 3 | 1,1805 | 0,82 | 40% | 45 | 0,5576 | 0,85 | 71% |
| 4 | 0,9889 | 1,08 | 57% | 46 | 1,3182 | 0,81 | 66% |
| 5 | 0,8274 | 0,90 | 63% | 47 | 0,4834 | 0,85 | 60% |
| 6 | 0,8464 | 0,90 | 63% | 48 | 1,4873 | 0,84 | 69% |
| 7 | 0,454 | 0,85 | 61% | 49 | 2,4044 | 0,82 | 47% |
| 8 | 0 | 0,00 | 0% | 50 | 0 | 0,00 | 0% |
| 9 | 0,5535 | 0,79 | 51% | 51 | 0,6102 | 0,87 | 74% |
| 10 | 0,4549 | 0,96 | 58% | 52 | 1,3062 | 0,87 | 62% |
| 11 | 0,4027 | 0,84 | 39% | 53 | 0,4637 | 0,89 | 57% |
| 12 | 0,4618 | 1,01 | 39% | 54 | 1,4234 | 0,81 | 71% |
| 13 | 0,4963 | 0,81 | 72% | 55 | 0,5056 | 0,81 | 43% |
| 14 | 0,5043 | 0,92 | 54% | 56 | 0,7509 | 0,98 | 47% |
| 15 | 0,4446 | 0,76 | 68% | 57 | 0,6967 | 0,82 | 73% |
| 16 | 0,5241 | 0,81 | 64% | 58 | 0,6191 | 0,93 | 51% |
| 17 | 0,5332 | 0,78 | 63% | 59 | 0,5657 | 1,01 | 56% |
| 18 | 1,5386 | 0,93 | 63% | 60 | 0,4681 | 1,04 | 49% |
| 19 | 0 | 0,00 | 0% | 61 | 0,4866 | 1,01 | 56% |
| 20 | 1,2058 | 0,93 | 63% | 62 | 1,3822 | 0,87 | 62% |
| 21 | 1,5141 | 0,85 | 61% | 63 | 1,4513 | 0,81 | 57% |

| | | | | | | | |
|----|--------|------|-----|----|--------|------|-----|
| 22 | 0 | 0,00 | 0% | 64 | 2,0143 | 0,79 | 72% |
| 23 | 1,8378 | 0,81 | 73% | 65 | 0,5632 | 0,85 | 44% |
| 24 | 0,4616 | 0,92 | 49% | 66 | 0,6649 | 0,99 | 49% |
| 25 | 0,4292 | 0,99 | 60% | 67 | 0,6175 | 0,81 | 77% |
| 26 | 1,0662 | 0,82 | 75% | 68 | 0,5117 | 0,96 | 42% |
| 27 | 0,5391 | 0,98 | 60% | 69 | 1,9363 | 0,81 | 56% |
| 28 | 0,4856 | 0,81 | 66% | 70 | 1,8961 | 0,81 | 57% |
| 29 | 0,4119 | 0,81 | 60% | 71 | 0,4954 | 0,84 | 61% |
| 30 | 1,2225 | 0,93 | 63% | 72 | 0,4259 | 0,85 | 59% |
| 31 | 1,5209 | 0,85 | 62% | 73 | 1,1943 | 0,82 | 63% |
| 32 | 0,6434 | 1,01 | 46% | 74 | 0,8332 | 0,90 | 61% |
| 33 | 1,6881 | 0,79 | 73% | 75 | 0,4327 | 0,82 | 43% |
| 34 | 0,4375 | 0,78 | 74% | 76 | 1,1931 | 0,92 | 59% |
| 35 | 0,4533 | 0,84 | 62% | 77 | 1,2197 | 0,92 | 59% |
| 36 | 2,0143 | 0,92 | 65% | 78 | 0,8777 | 0,79 | 57% |
| 37 | 1,3356 | 0,81 | 65% | 79 | 0,8239 | 0,85 | 70% |
| 38 | 0 | 0,00 | 0% | 80 | 0,7786 | 0,95 | 83% |
| 39 | 0,6468 | 0,99 | 49% | 81 | 0,8317 | 0,92 | 74% |
| 40 | 3,5031 | 0,84 | 46% | 82 | 0,8869 | 0,81 | 95% |
| 41 | 0,4567 | 0,79 | 67% | 83 | 0,9423 | 0,87 | 78% |
| 42 | 1,0396 | 0,85 | 68% | 84 | 0,7217 | 0,87 | 64% |

Tabela 1 - Parâmetros dos elementos do transdutor

7. Conclusão

De maneira geral, o transdutor desenvolvido ao longo deste projeto atende às expectativas estabelecidas. O funcionamento do transdutor é satisfatório e os elementos que ficaram inativos devidos a problemas na fabricação não influenciaram significativamente os testes realizados.

Um dos principais pontos que podem ser observados é a necessidade de organização de tempo, tendo em vista que o processo de fabricação é longo, principalmente considerando a soldagem de ambas as pontas dos cabos, uma na cerâmica e outra no conector. Além disso, cada aplicação das camadas de backing e matching exige um tempo de cura de aproximadamente 24 horas, que deve ser considerada no planejamento do projeto.

Há diversos detalhes que podem prejudicar o andamento do trabalho, por isso é importante ter cautela na fabricação do transdutor. Problemas como solda fria, curto-circuito, má organização dos cabos e soldagem incorreta dos elementos podem danificar o projeto de forma irreversível. Por este motivo o protótipo foi manuseado atentamente durante todo o processo.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o aprofundamento em diferentes técnicas de formação de imagem por ultrassom. No projeto foi estudada apenas a técnica de abertura sintética, que não focaliza os feixes acústicos. A utilização de técnicas mais elaboradas de acionamento de elementos é uma forma de expandir a utilização de transdutores array bidimensionais.

8. Referências Bibliográficas

AKHNAK, M., MARTÍNEZ, O., GÓMEZ-ULLATE, L., MONTERO DE ESPINOSA, F.: Caracterización de un array ultrasónico de anillos segmentados. Instituto de Acústica CSIC, Serrano 144, 28006 Madrid, España. Instituto de Automática Industrial CSIC, Arganda del Rey, Madrid, España.

ANDREUCCI, R. "Ensaio Por Ultra-Som: Aplicação Industrial." Associação Brasileira de Ensaios Não-Destrutivos. São Paulo, 2003.

BELASSIANO, E.: Desenvolvimento de um Transdutor Ultra-sônico Matricial Bidimensional para Aplicações Doppler [Rio de Janeiro] 2004 XIII, 107 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Biomédica, 2004) Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

BUIOCHI, F., OLIVEIRA T. F., BUIOCHI E. B., ADAMOWSKI J. C.: Processo de Construção de Transdutores Ultrassônicos Matriciais Lineares. XXIII Congresso Brasileiro em Engenharia Biomédica – XXIII CBEB, Porto de Galinhas, 2012.

DRINKWATER, B. W., WILCOX, P. D., “Ultrasonic Arrays for Non-destructive Evaluation: A Review”, Paul D. Department of Mechanical Engineering, University of Bristol, BS3 1TR, UK, 2006.

GALLEGO-JUAREZ, J. A., “Piezoelectric Ceramics and Ultrasonic Transducers”, J. Phys. E: Sci. Instrum, No. 22, 1989.

GUESS, J. F., OAKLEY, C. G., DOUGLAS, S. J., MORGAN, R. D., 1995, “Cross-talk in Array Transducers”, IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 1279-1282.

INDAC – Instituto Nacional para o Desenvolvimento do Acrílico, SIGN 2014 – São Paulo.

KINO, G. Acoustic waves: devices, imaging, and analog signal processing. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc., 2000.

MATUDA, MARCELO YASSUNORI: Formação de imagens de peças com superfícies curvas utilizando arrays ultrassônicos/ M.Y. Matuda. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. São Paulo, 2014.

MORGAN MATROC LIMITED “Piezoelectric Ceramics” Transducer Products Division, England.

NAMINDOME, G.: Fabricação e caracterização de transdutores ultrassônicos matriciais lineares. FAPESP, Processo número 2010 / 06180-2. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

OLIVEIRA, TIMOTEO FRANCISCO DE: Transdutores de ultrassom multielementos lineares flexíveis com sensor de curvatura para superfícies curvas / T. F. Oliveira -- versão corr. – São Paulo, 2015. 207 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

PAPADAKIS, E.P., OAKLEY, C.G., SELFRIDGE, A.R., MAXFIELD, B., “Fabrication and Characterization of Transducers”, Physical Acoustics, vol. 24, 1999.

SÁNCHEZ, ISRAEL DOMÍNGUEZ: Metodologia para à Avaliação do “Cross-Talk” em Transdutores Ultra-sônicos Matriciais [Rio de Janeiro] 2003 XI, 84 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Biomédica, 2003) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

SHUNG, K. K., ZIPPARO, M., "Ultrasonic Transducers and Arrays", IEE Engineering IN medicine and Biology, 1996.

TURNBULL, D. H., FOSTER, F. S., 1992, "Fabrication and Characterization of Transducer Elements in Two-dimensional Arrays for Medical Ultrasound Imaging", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, v. 39, n. 4(Jul).

WHITTINGHAM, T. A., 1997, "New and Future Developments in Ultrasonic Imaging", The British Journal of Radiology, v. 70, pp. S119-S132.