VICTOR INACIO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DE DISPOSITIVOS CMUTS FABRICADOS COM MÉTODOS E
MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA APLICAÇÃO POTENCIAL EM ENSAIOS NÃO
DESTRUTIVOS**

**São Paulo
2014**

Victor Inacio de Oliveira

ESTUDO DE DISPOSITIVOS CMUTS FABRICADOS COM MÉTODOS E
MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA APLICAÇÃO POTENCIAL EM ENSAIOS NÃO
DESTRUTIVOS

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção de Título de Doutor em
Ciências.

São Paulo
2014

Victor Inacio de Oliveira

ESTUDO DE DISPOSITIVOS CMUTS FABRICADOS COM MÉTODOS E
MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA APLICAÇÃO POTENCIAL EM ENSAIOS NÃO
DESTRUTIVOS

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção de Título de Doutor em
Ciências.

Área de concentração: Engenharia de
Controle e Automação Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ettore Apolonio
de Barros

São Paulo
2014

Dedico este trabalho a minha esposa
Vanessa e a minha filha Alice.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da USP (PMR-EPUSP) pelo uso das instalações e por ter me recebido como aluno de doutorado.

Ao SENAI-SP pelo apoio incondicional as atividades que realizei neste trabalho.

Ao Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica da USP (LSI-EPUSP) pelo uso de instalações e equipamentos.

Ao Laboratório de Microfabricação do *Brazilian Nanotechnology National Laboratory (LNNano)* pelo uso de instalações e equipamentos.

Ao Prof. Dr. Ettore Apolonio de Barros pela orientação.

Ao Prof. Dr. Ricardo Cury Ibrahim pelo apoio, paciência, orientação e incentivo.

Ao Prof. Dr. Delson Torikai por discussões que contribuíram muito para este trabalho.

Ao colega de laboratório e de faculdade Dr. Lucas G. D. Mendonça, pelas discussões e apoio no decorrer de todo o trabalho.

Aos colegas do SENAI-SP, Hugo Magalhães Martins e Alberto Mitio Tsuda pela ajuda com o circuito de aquisição de dados.

Ao colega e técnico do LSI TEC Valtemar F. Cardoso, pela ajuda na operação da prototipadora laser.

Ao especialista de laboratório do LSI Ricardo Rangel, pela grande ajuda nos processos de fabricação.

A todos os Professores, amigos, colegas e familiares que de alguma forma contribuíram na minha formação profissional e pessoal.

“Não existem métodos fáceis para resolver
problemas difíceis”

René Descartes

RESUMO

O presente trabalho propõe o estudo de dispositivos CMUTs fabricados através de métodos e materiais alternativos com potencial aplicação em ensaios não destrutivos. O CMUT é constituído por uma membrana condutiva colocada sobre uma cavidade com o fundo metalizado, formando uma estrutura capacitiva. Ondas acústicas incidentes criam uma vibração na membrana que modifica de forma detectável a capacitância do dispositivo (modo de detecção). De modo inverso, é possível aplicar tensão alternada sobre a estrutura do CMUT fazendo com que a membrana vibre gerando ondas acústicas (modo de emissão). Hoje as principais tecnologias utilizadas para detecção e emissão de ondas acústicas utilizam materiais piezelétricos que são de difícil obtenção, possuem baixa integrabilidade e restrições em aplicações em altas temperaturas. O transdutor proposto baseia-se na tecnologia MEMS onde efeitos elétricos e mecânicos são combinados de forma a atender uma determinada aplicação. Os dispositivos MEMS são fabricados por técnicas de microfabricação, o que diminui o custo de produção e possibilita o uso de diversos tipos de materiais. Antes da fabricação dos CMUTs, foram feitas modelagens analíticas e computacionais visando determinar as dimensões ideais dos dispositivos a serem fabricados e também quais materiais seriam melhores se aplicados como membrana. A partir dos resultados da modelagem foi possível determinar que CMUTs com membrana de cobre fossem fabricados. Com os resultados da modelagem foram propostos métodos de fabricação baseados em técnicas de *wafer-bonding*. Dois materiais foram utilizados para produzir as cavidades, um deles foi o fotorresiste SU-8 e outro uma resina adesiva de secagem rápida, material este não convencional para produção de CMUTs. No primeiro caso, as cavidades foram abertas por processo de fotolitografia, já no segundo foi utilizado um método de corrosão a laser, também não convencional. Diferentes métodos foram utilizados na colagem das membranas, sendo que membranas coladas com resina adesiva e membranas deixadas suspensas sobre as cavidades apresentaram melhores resultados. As caracterizações elétricas e acústicas realizadas nos dispositivos fabricados mostraram que os CMUTs obtidos possuem características capacitivas e podem emitir e receber, comprovando assim seu funcionamento. Isto indica que os roteiros de fabricação propostos são eficientes e que os materiais e métodos utilizados se mostraram adequados. Além disso, a partir das caracterizações acústicas é possível dizer que os CMUTs fabricados podem ser potencialmente aplicados em ensaios não destrutivos, principalmente em análise de vibrações.

Palavras chave: Ensaios não destrutivos, Ultrassom, Método dos elementos finitos, Análise de vibrações, CMUT, MEMS.

ABSTRACT

This thesis proposes the study of CMUT devices produced using alternative methods and materials with potential application in non-destructive analysis. CMUT is composed of a metallized substrate covered with an insulator cavity structure and a conductive membrane on its top, forming a capacitive structure. Incident acoustic waves cause vibration in the membrane modifying their capacitance (detection mode). AC voltage can be applied on the structure of the CMUT causing the membrane to vibrate generating acoustic waves (transmission mode). Today the main technologies used for the detection and emission of acoustic waves use piezoelectric materials that are difficult to obtain, have low integrability and restrictions in high temperature applications. The proposed transducer is based on MEMS technology where electrical and mechanical effects are combined to suit a particular application. MEMS devices are manufactured by microfabrication techniques, which reduce the cost of production and allow the use of various types of materials. Before the fabrication of CMUTs, analytical and computational modeling were made to determine the optimal dimensions of the devices to be manufactured and also what materials would be best if applied as membrane. From the modeling results CMUTs with copper membrane were manufactured. Based on the results of the modeling process, manufacturing methods based on wafer-bonding techniques were proposed. Two materials were used to produce the cavities: one of them was the SU-8 photoresist and the other an acrylic adhesive, an unconventional material for the production of CMUTs. In the first case the cavities were opened by the photolithographic process. In the second method the corrosion laser was used, which is also unconventional. Different methods were used to bond the membranes. The membranes bonded with acrylic adhesive and left suspended over the cavity wells showed better results. The electric and acoustic characterizations performed on fabricated devices showed that CMUTs present capacitive characteristics and can emit and receive acoustic waves, thus proving its operation. This indicates that the proposed manufacturing routes are efficient and that the materials and methods used are appropriate. Moreover, these results show that the manufactured CMUTs may be potentially applied to nondestructive analyses, especially in analyses of vibrations.

Key-words: Nondestructive analyses, Ultrasound, Finite Elements Method, analyses of vibrations, CMUT, MEMS

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Representação da montagem física e do funcionamento do CMUT .	23
Figura 1.2 – Processo de <i>wafer-bonding</i>	24
Figura 2.1 – Tipos de ondas acústicas	28
Figura 2.2 – Fenômenos de transmissão e reflexão de ondas acústicas incidentes em uma interface entre dois meios fluídos	29
Figura 2.3 – Ilustração da carga q (indicada pelas setas) distribuída na superfície da membrana circular de diâmetro d e espessura t	31
Figura 2.4 – Três primeiros modos de vibrar de uma membrana circular engastada na borda.	33
Figura 2.5 – Capacitor de placas paralelas	35
Figura 2.6 – Estruturas do CMUT.....	36
Figura 2.7 – Circuito de acoplamento AC-DC.....	37
Figura 2.8 – Representação da forma de onda aplicada sobre o CMUT quando este está submetido ao acoplamento AC-DC	37
Figura 3.1 – Modelo da membrana utilizado nas simulações estáticas.....	44
Gráfico 3.1 – Curvas de análise da deflexão máxima da membrana em função da espessura e diâmetro da membrana	46
Gráfico 3.2 – Análise analítica modal	48
Figura 3.2 – Cilindros usados na análise por MEF	50

Gráfico 3.3 – Curvas de análise da deflexão máxima da membrana em função da espessura e diâmetro feito pelo método de elementos finitos.....	52
Figura 3.3 – Resultados obtidos no software ANSYS 10.0 para a deflexão da membrana de silício	53
Figura 3.4 – Resultados obtidos no software ANSYS 10.0 para a deflexão da membrana de cobre	53
Figura 3.5 – Resultados obtidos no software ANSYS 10.0 para a deflexão da membrana de PDMS.....	54
Figura 3.6 – Resultados obtidos no software ANSYS 10.0 para a deflexão da membrana de SU-8	54
Figura 3.7 – Modelo utilizado na simulação do comportamento da membrana do CMUT quando esta está submetida à ação da pressão atmosférica somada a tensão de polarização DC	57
Gráfico 3.4 – Mostra os resultados da análise obtidos para o Si com uma espessura de cavidade de 1 μ m	59
Gráfico 3.5 – Mostra os resultados da análise obtidos para o cobre com uma espessura de cavidade de 1 μ m	60
Gráfico 3.6 – Mostra os resultados da análise obtidos para o SU-8.....	61
Gráfico 3.7 – Análise computacional modal	62
Figura 4.1 – Mostra o processo de <i>wafer-bonding</i>	64
Figura 4.2 – Em (a) a máscara utilizada para definição dos padrões dos eletrodos inferiores é mostrada. A máscara utilizada na criação das cavidades é mostrada em (b)	66
Figura 4.3 – Etapas de processo utilizadas para fabricação da estrutura da cavidade do CMUT	67

Figura 4.4 – Resultados da fabricação.....	68
Figura 4.5 – Etapas de fabricação da estrutura da membrana de cobre com deposição de resina adesiva.....	69
Figura 4.6 – Fotografia do CMUT obtido com membrana de cobre colada com resina adesiva.....	69
Figura 4.7 – Etapas de fabricação da estrutura da membrana de cobre com colagem fora da borda da cavidade.....	70
Figura 4.8 – Fotografia do CMUT obtido com membrana de cobre solta.....	70
Figura 4.9 – Etapas de fabricação da estrutura da membrana de cobre com colagem total	70
Figura 4.10 – Fotografia do CMUT obtido com membrana de cobre colada com cola condutiva.....	71
Figura 4.11 – Parâmetros de dimensões para os três CMUTs fabricados.....	71
Figura 4.12 – Fotografias das amostras obtidas pelo processo descrito acima	72
Figura 4.13 – Padrão dos CMUTs transferidos para substrato de cobre para formação dos eletrodos inferiores	74
Figura 4.14 – Em (a) está mostrada a placa de circuito impresso sem as estruturas. Já em (b) é possível ver a mesma placa com as estruturas transferidas	74
Figura 4.15 – Fotografias das estruturas das cavidades obtidas em um microscópio ótico após o processo de fotolitografia	75
Figura 4.16 – CMUT fabricado pelo processo descrito nesta seção, a posição dos diferentes diâmetros fabricados é mostrada.....	75
Figura 4.17 – Etapas de fabricação da estrutura da cavidade utilizando remoção a laser	77

Figura 4.18 – Imagem da prototipadora laser modelo <i>protolaser U3</i> da fabricante <i>LPKF laser and electronics</i>	77
Figura 4.19 – Mostra a placa de fenolite cobreada nas etapas do processo de produção das estruturas das cavidades.....	78
Figura 4.20 – Padrão transferido para o filme de acrílico depositado sobre a placa cobreada. Foi escolhido o diâmetro de 600 μ m	79
Figura 4.21 – Fotos de microscópio ótico. Os detalhes das estruturas da cavidade obtidas são mostrados	79
Figura 4.22 – Parâmetros de dimensões para os três CMUTs fabricados. Em (a) CMUT com membrana de cobre e resina adesiva	80
Gráfico 5.1 – Capacitância em função do diâmetro.....	84
Gráfico 5.2 – Capacitância em função do diâmetro em função da espessura da cavidade para amostras de diferentes diâmetros de cavidade.....	84
Figura 5.1 – Circuito <i>bias-tee</i> utilizado para polarização do CMUT.....	85
Gráfico 5.3 – Capacitância em função da tensão de polarização.....	86
Figura 5.2 – Circuito de acoplamento AC-DC utilizado para verificação do funcionamento dos CMUTs no modo emissor	88
Figura 5.3 – Arranjo utilizado nas medições do CMUT como emissor. É possível ver o CMUT e o microfone utilizado como receptor	88
Figura 5.4 – Imagem do software <i>RODE rec</i> , utilizado nas análises de recepção do CMUT. Retirado de (RODE, 2014)	89
Gráfico 5.4 – Curvas de resposta a emissão.....	89
Figura 5.5 – Arranjo utilizado nas medições do CMUT como receptor	90
Figura 5.6 – Gráfico de resposta em frequência do emissor utilizado nas medições de recepção do CMUT	91

Figura 5.7 – Circuito utilizado na captação dos sinais de recepção do CMUT	92
Figura 5.8 – Plataforma de desenvolvimento Arduino	92
Gráfico 5.5 – Curva de <i>sweep</i> gerada no software <i>function generator</i>	93
Figura 5.9 – Imagem do software <i>function generator</i> , utilizado nas análises de recepção do CMUT	93
Gráfico 5.6 – Curvas de resposta a recepção	94
Gráfico 5.7 – Curva de intensidade de emissão em função da tensão de polarização VDC	96
Gráfico 5.8 – Gráfico da influência da distância da fonte emissora (piezo) do CMUT.	97
Gráfico 5.9 – Intensidade de recepção do CMUT em função da intensidade de emissão	98
Figura 5.10 – Mostra a matriz de cavidade produzida pelo método de corrosão a laser	99
Gráfico 5.10 – Variação da capacitância da amostra CA600 com a tensão de polarização	100
Gráfico 5.11 – Variação da capacitância da amostra AC600 com a tensão de polarização	100
Gráfico 5.12 – Variação da capacitância da amostra CS600 com a tensão de polarização	101
Gráfico 5.13 – Curvas de resposta a emissão para as amostras CA600 e CS600	102
Gráfico 5.14 – Curvas de resposta a recepção para a amostra CS600	103

Gráfico 5.15 – Curvas de resposta a recepção para a amostra CA600	103
Gráfico 5.16 – Curvas de resposta a recepção para a amostra AC600	104
Gráfico 5.17 – Intensidade do pico de recepção em 1280Hz para a amostra CS600 em função da tensão de polarização VDC	105
Gráfico 5.18 – Intensidade do pico de recepção em 1470Hz para a amostra CA600 em função da tensão de polarização VDC	105
Gráfico 5.19 – Gráfico da influência da distância da fonte emissora (piezo) do CMUT, amostra CA600	106
Gráfico 5.20 – Gráfico da influência da distância da fonte emissora (piezo) do CMUT, amostra CS600	107
Gráfico 5.21 – Intensidade de recepção do CMUT em função da intensidade de emissão, para a amostra CS600	108
Gráfico 5.21 – Intensidade de recepção do CMUT em função da intensidade de emissão, para a amostra CA600	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do silício, SU-8, PDMS, cobre.	45
Tabela 3.2 – Valores bases de diâmetro e espessura que foram utilizados na simulação para os 4 materiais da membrana.....	45
Tabela 3.3 – Dimensões das membranas utilizadas	47
Tabela 3.4 – Valores bases de diâmetro e espessura que foram utilizados na simulação para o PDMS.....	51
Tabela 3.5 – Resultados obtidos através da simulação pelo método dos elementos finitos	55
Tabela 3.6 – Dimensões da membrana que podem eventualmente serem fabricadas considerando o material sendo o silício e o Cobre.....	56
Tabela 3.7 – Dimensões da membrana que podem eventualmente serem fabricadas considerando o material sendo o SU-8	56
Tabela 3.8 – Dimensões da membrana que podem eventualmente serem fabricadas considerando o material sendo o PDMS	56
Tabela 3.9 – Dimensões das membranas simuladas	58
Tabela 4.1 – Parâmetros de dimensões para os CMUTs fabricados	72
Tabela 4.2 – Valores de capacitância encontrados para os CMUTs fabricados	72
Tabela 4.3 – Parâmetros de dimensões para os CMUTs fabricados	75
Tabela 4.4 – Valores de capacitância encontrados para os CMUTs fabricados	76

Tabela 4.5 – Principais características da prototipadora <i>protolaser U3</i> da fabricante <i>LPKF laser and electronics</i>	78
Tabela 4.6 – Parâmetros de dimensões para os CMUTs fabricados	81
Tabela 4.7 – Valores de capacitância encontrados para os CMUTs fabricados	81
Tabela 5.1 – Características das diferentes amostras e denominação de cada uma delas.....	83
Tabela 5.2 – Valores de referência dos componentes utilizados no circuito de polarização. O resistor utilizado foi de ¼ de watt e o capacitor é cerâmico	85
Tabela 5.3 – Valores de referência dos componentes utilizados no circuito de captação de sinal de recepção.....	92
Tabela 5.4 – Características das diferentes amostras e denominação de cada uma	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente alternada
CMUT	<i>Capacitive Micromachined Ultrasound Transducer (transdutor de ultrassom microeletrômecanico capacitivo)</i>
CVD	<i>Chemical Vapor Deposition (deposição química a vapor)</i>
DC	Corrente contínua
END	Ensaio não destrutivo
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEMS	<i>Micromachined Electromechanical Systems (sistemas microeletrômecanico)</i>
MOCVD	<i>Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (deposição química a vapor com metal e orgânico)</i>
P-CMUT	<i>Polymer Capacitive Micromachined Ultrasound Transducer (transdutor de ultrassom microeletrômecanico capacitivo de polímero)</i>
PDMS	<i>Polidimetilsiloxano</i>
PVD	<i>Physical Vapor Deposition (deposição física a vapor)</i>
SPL	<i>Sound Pressure Level</i> (nível de pressão sonora)
SU-8	Fotorresina negativa epoxy
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da membrana
a	Coeficiente de atenuação de uma onda acústica com frequência de 1 MHz
b	Coeficiente de dependência entre f e a
C	Capacitância
c	Velocidade de propagação da onda
c_l	Velocidade de propagação da onda longitudinal
d	Diâmetro da membrana
D	Rigidez de flexão da membrana
E	Módulo de Elasticidade ou Young
f	Frequência
F	Força
$F_{\text{elástica}}$	Força elástica
$F_{\text{elétrica}}$	Força elétrica
f_{01}	Frequência de vibração do primeiro modo
f_{11}	Frequência de vibração do segundo modo
f_{21}	Frequência de vibração do terceiro modo
g	Espessura do dielétrico ou espessura da cavidade
K	Constante elástica da membrana
l	Comprimento de onda
m	Número de nodos circulares
M_c	Momento Fletor central
n	Número de nodos diametrais
P_r	Intensidade da onda acústica refletida
P_i	Intensidade da onda acústica incidida
$P(r,t)$	Campo de pressão acústica

q	Pressão atmosférica
q_i	Ângulo de incidência de uma onda acústica em uma interface entre dois materiais
q_r	Ângulo de reflexão de uma onda acústica em uma interface entre dois materiais
q_t	Ângulo de transmissão de uma onda acústica em uma interface entre dois materiais
R	Coeficiente de reflexão de uma onda acústica
r	distância entre a fonte emissora e o ponto a ser medido
Si	silício
T	Período
t	Espessura da membrana
T_t	Coeficiente de transmissão de uma onda acústica
V_{coll}	Tensão de colapso do CMUT
VDC	Tensão elétrica contínua
VAC	Tensão elétrica alternada
y_c	Deflexão máxima da membrana
Z	Impedância acústica
W	Energia
α	Coeficiente de atenuação de uma onda acústica
ρ	Densidade
ν	Coeficiente de Poisson
ε	Permissividade Elétrica

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	22
1.1 Justificativa.....	25
1.2 Objetivo	25
CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA.....	27
2.1 Princípios de acústica.	27
2.1.1 Ondas acústicas.	27
2.1.2 Propagação do sinal acústico.	28
2.1.3 Atenuação do sinal acústico.	30
2.2 Modelagem da membrana.	31
2.2.1 Modelagem Estática.	31
2.2.2 Modelagem Modal	33
2.3 Eletromecânica.	34
2.3.1 Capacitores de placas paralelas.....	34
2.3.2 Polarização do CMUT.....	36
2.4 Método dos elementos finitos.....	38
2.5 Métodos de fabricação.....	39
2.5.1 Deposição de materiais.	39
2.5.2 Fotolitografia.	40
2.5.3 Micro-usinagem (corrosão).	40
2.5.4 Prototipagem de PCI a laser.....	41
2.6 Ensaaios não destrutivos	41
2.6.1 Análise de vibrações.....	42
2.6.2 Ultrassom	43
CAPÍTULO 3: MODELAGEM	44
3.1 Modelagem Analítica.	44
3.1.1 Modelagem analítica da membrana.....	44
3.1.2 Modelagem analítica modal.	46
3.2 Modelagem Computacional.....	48

3.2.1	Modelo de análise estática da membrana: Membrana sob ação da pressão atmosférica.	49
3.2.2	Modelo de análise estática da membrana: Membrana sob ação da pressão atmosférica somada a tensão de polarização DC.....	57
3.2.3	Análise modal da membrana.	61
CAPÍTULO 4: FABRICAÇÃO.		64
4.1	Métodos de fabricação.	64
4.1.1	Processo para CMUT com membrana de cobre, substrato de vidro metalizado com alumínio e cavidade de SU-8.....	65
4.1.2	Processo para CMUT com membrana de cobre, substrato de fibra de vidro metalizado com cobre e cavidade de SU-8.....	73
4.1.3	Processo para CMUT com membrana de cobre, substrato de fibra de vidro metalizado com cobre e cavidade de adesivo acrílico produzida com laser.	76
CAPÍTULO 5: CARACTERIZAÇÕES ELETRO-MECÂNICAS.		82
5.1	Capacitância do CMUT	82
5.1.1	Polarização do CMUT.....	85
5.2	CMUT como emissor.....	87
5.3	CMUT como receptor	90
5.3.1	Efeito da tensão de polarização sobre a recepção	96
5.3.2	Efeito da distância do emissor sobre a recepção	97
5.3.3	Efeito da intensidade do emissor sobre a recepção	97
5.4	CMUT fabricado com resina adesiva removida a laser	98
5.4.1	Influência da tensão de polarização na capacitância.....	100
5.4.2	CMUT como emissor	101
5.4.3	CMUT como receptor	102
5.4.4	Efeito da tensão de polarização sobre a recepção	104
5.4.5	Efeito da distância do emissor sobre a recepção	106
5.4.6	Efeito da intensidade do emissor sobre a recepção	107
CONCLUSÕES.		109
TRABALHOS PUBLICADOS.....		111
INOVAÇÕES		112
PERSPECTIVAS.....		113
REFERÊNCIAS.....		114

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Por muitos anos os materiais piezelétricos dominaram quase que absolutamente a transdução de ultrassom (ROSENBAUM, 1988) e até hoje são muito utilizados (PHILIPS, 2012).

A função de um transdutor de ultrassom é converter energia proveniente das ondas mecânicas, conhecidas como ondas acústicas, em energia elétrica ou vice versa. Esse conceito foi utilizado no início dos anos 1920 na criação do primeiro sonar (LANGEVIN, 1920). Os materiais piezelétricos cumprem esse papel de uma maneira muito boa, já que geram tensão elétrica quando submetidos a variações de pressão (piezeletricidade direta) e vibram quando submetidas a tensões elétricas alternadas, gerando assim ondas acústicas. Esse fenômeno é conhecido como piezeletricidade reversa (LIPPMAN, 1881). A propriedade piezeletricidade direta foi descoberta em 1880 pelos Curie (CURIE; CURIE, 1880).

As primeiras cerâmicas piezelétricas só surgiram nos anos 40 (ROBERTS, 1947). E no final dos anos 60 surgem os polímeros piezelétricos (KAWAI, 1969), já em 1981 os primeiros piezocompósitos são obtidos (KLICKER; et al, 1981).

Transdutores de ultrassom baseados em dispositivos MEMS conhecidos como MUTs (*Micromachined Ultrasound Transducer*, transdutores de ultrassom micro-mecânicos) começaram a ser estudados a partir da década de 80, porém estes dispositivos ainda eram de difícil fabricação e também não conseguiam competir em termos de desempenho com os materiais piezelétricos, principalmente com os piezocompósitos (SUZUKI et al, 1989).

Em meados dos anos 90 os CMUTs (*Capacitive Micromachined Ultrasound Transducer*, transdutores de ultrassom micro-mecânicos capacitivos) foram introduzidos por um grupo de pesquisadores da universidade de Stanford nos

Estados Unidos da América (HALLER; KHURI-YAKUB, 1994). Esses dispositivos são baseados no efeito capacitivo (BOZKURT; et al, 1996). Como sua produção é feita pelas técnicas de fabricação de microeletrônica, a cavidade do dispositivo pode ter dimensões bem pequenas o que aumenta a capacitância do dispositivo (BOYLESTEAD, 2004).

Outra vantagem é a integrabilidade do transdutor com circuitos eletrônicos no mesmo circuito integrado, já que ambos podem ser produzidos simultaneamente no processo de fabricação (WYGANT; et al, 2009). Mas uma característica importante dos CMTUs é a possibilidade do dispositivo poder ser fabricado de forma unidimensional (JIN; et al, 2001) ou em matrizes (arrays) bidimensional (ORALKAN; et al, 2002). Essas matrizes podem ser usadas mais eficientemente na formação de imagens (VAITHILINGAM; et al, 2009), já que os transdutores piezelétricos aplicados para este fim são lineares.

O CMUT baseia-se no efeito capacitivo (ERGUN; et al, 2005). A estrutura básica pode ser vista na figura 1.1(a). Com a aplicação da tensão nos contatos, haverá o surgimento de cargas elétricas contrárias na membrana (eletrodo superior) em relação ao substrato (eletrodo inferior). Fazendo com que haja o aparecimento de forças de atração entre os dois (HALLIDAY; RESNICK, 2003). Se a tensão aplicada for alternada com uma frequência f , a força de atração será variável fazendo com que a membrana vibre na mesma frequência de f . A cavidade permite que a membrana vibre, gerando assim ondas acústicas, neste caso o CMUT trabalha no modo de emissão (figura 1.1(b)). De forma inversa o CMUT pode ser utilizado como um receptor de ondas acústicas.

Figura 1.1 – Representação da montagem física e do funcionamento do CMUT. Em (a) vemos a estrutura. Em (b) uma tensão AC é aplicada (1), ocorre a vibração da membrana (2) e a emissão das ondas acústicas (3). Em (c) uma tensão de polarização é aplicada (V_{dc}) as ondas chegam ao dispositivo (1) a membrana vibra (2) e a tensão AC é gerada (3).

Por volta de meados dos anos 2000 pesquisadores Taiwaneses introduziram o conceito de P-CMUT (*Polymer – Capacitive micromachined Ultrasound Transducer*). Os P-CMUTs usam como membrana materiais poliméricos que são mais flexíveis que as membranas de silício (WEI; CHANG et al, 2006). Esta maior flexibilidade permite que uma menor tensão elétrica, para polarizar o dispositivo, seja utilizada. O processo de fabricação do P-CMUT é extremamente complexo e ainda é um dos empecilhos para seu uso. Porém, algumas novas técnicas vêm surgindo, sendo que uma das mais promissoras é a que usa o *wafer-bonding* (colagem) (PARK; et al, 2011).

A técnica de *wafer-bonding* para CMUT baseia-se na colagem da membrana sobre a estrutura da cavidade do dispositivo (PARK; et al., 2011), como pode ser visto na figura 1.2. O presente trabalho pretende mostrar novos métodos de fabricação utilizando a técnica de *wafer-bonding*. Além disso, materiais alternativos, como metais sendo aplicados como membrana, e também fotorresistes e colas acrílicas sendo utilizadas na fabricação das cavidades. Como existem poucos grupos trabalhando com CMUT no Brasil é importante estabelecer um método de fabricação adaptado à realidade nacional. Isto fomentará em outros pesquisadores brasileiros estudar sobre estes dispositivos.

Figura 1.2 – Processo de *wafer-bonding*. Em (a) é mostrada a membrana de material polimérico depositado sobre um substrato que pode ser, por exemplo, metálico. Em (b) a estrutura da cavidade é mostrada. Após, é feito a colagem (*bonding*) da membrana sobre os postes da estrutura da cavidade (c).

1.1 Justificativa

Em áreas multidisciplinares o uso da tecnologia de ultrassom vem ganhando força nos dias de hoje. Mas, atualmente a principal forma de gerar ou receber ondas acústicas de ultrassom é através do uso de materiais piezelétricos, que são de difícil obtenção, baixa integrabilidade e possuem restrições para trabalhar em temperaturas elevadas. O presente trabalho mostra um estudo de um novo tipo de dispositivo transdutor de ultrassom que poderá substituir esses materiais piezelétricos em diversas aplicações.

O transdutor proposto baseia-se na tecnologia MEMS onde efeitos elétricos e mecânicos são combinados de forma a atender uma determinada aplicação. Uma das grandes vantagens desta tecnologia está no fato de utilizar tecnologia microeletrônica o que permite uma maior integrabilidade do transdutor com circuitos eletrônicos e ainda um custo de produção mais baixo.

Como aqui no Brasil existem poucos laboratórios específicos de microfabricação foi desenvolvido um método mais simples, baseado em resinas adesivas, para fabricação de estruturas do transdutor.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo viabilizar a tecnologia de projeto, fabricação e caracterização de dispositivos CMUTs através de métodos e materiais alternativos com potencial aplicação em ensaios não destrutivos. Mais especificamente:

- aplicação de equações analíticas consolidadas na área de Resistência de Materiais para uma modelagem inicial mais rápida;
- aplicação do Método dos Elementos Finitos, através de aplicativo comercial de boa reputação, para uma modelagem mais definitiva e para comprovação da precisão do método anterior (equações analíticas);

- uso de técnicas mais baratas para o processo de microfabricação, com desenvolvimento de equipamento próprio;
- desenvolvimento e montagem de sistemas para caracterização de CMUTs.

CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Princípios de acústica.

2.1.1 Ondas acústicas.

Classifica-se uma onda acústica como sendo uma onda mecânica que utiliza um meio material para se propagar (KINO, 1987). As ondas acústicas são classificadas por sua frequência de oscilação. O ultrassom é uma onda acústica que possui uma frequência de oscilação superior a 20kHz e inferior a 1GHz, já as ondas acústicas audíveis estão entre 20Hz e 20kHz. Além destas faixas temos o infrassom que engloba frequências abaixo de 20Hz e o hipersom que possui frequência acima de 1GHz (BLAUERT; XIANG, 2008).

As ondas acústicas basicamente se dividem em dois grupos: ondas longitudinais e ondas transversais. As ondas longitudinais são aquelas que têm sua propagação no mesmo sentido das partículas ou da excitação que gerou a oscilação das partículas (figura 2.1 (a)). Já as ondas transversais são aquelas que provocam oscilações nas partículas em sentido perpendicular ao seu sentido de propagação (figura 2.1 (b)). Porém as ondas transversais aparecem apenas em sólidos por serem os únicos a resistirem às tensões de cisalhamento, enquanto as longitudinais estão presentes em todos os meios, sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos (KINSLER et al, 1982). Este trabalho terá foco em meios fluídicos, já que a aplicação proposta é medir a vibração de máquinas.

Nas ondas longitudinais e transversais, conforme o oscilador de excitação se movimenta, as partículas irão se movimentar de forma oscilante transmitindo movimento de avanço para partículas vizinhas, gerando assim a propagação. Conforme as partículas se propagam, é gerado um campo de pressão na sua trajetória. Esta propagação e o campo de pressão terão uma frequência f , e uma velocidade c determinadas pelo oscilador. Se considerarmos τ como sendo o período de uma oscilação então o comprimento λ desta onda será determinado por: $\lambda = c \cdot \tau$ e temos que $f = 1/\tau$. Estes são os principais parâmetros de uma onda mecânica (KINSLER et al,1982). O oscilador de excitação pode perfeitamente ser um transdutor piezelétrico ou um CMUT.

Figura 2.1 – Tipos de ondas acústicas. A figura (a) mostra a representação de uma onda longitudinal. Vê-se que a excitação que gera a oscilação das partículas está na mesma direção de propagação da onda, a excitação gera momento de compressão e rarefação nas partículas. Já na figura (b) a representação de uma onda transversal é mostrada. Nota-se que a excitação é perpendicular a direção de propagação.

2.1.2 Propagação do sinal acústico.

Da mesma forma do que o observado no estudo da ótica as ondas acústicas também podem sofrer reflexão, transmissão e absorção dependendo do meio onde se propagam (GARDONIO; FAHY, 2007). A velocidade de propagação (considerando meios isotrópicos) é dada por:

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

Todos os materiais apresentam certa oposição à passagem desta onda acústica. Esta oposição é denominada impedância acústica e é representada pela

letra Z (ROSENBAUM,1988). Basicamente a impedância acústica em fluidos é função do tipo de fluido (meio) e da velocidade de propagação da onda, como mostrado na equação (2.2).

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

Onde ρ é a densidade do meio de propagação (kg/m^3), c é a velocidade de propagação da onda dada em (m/s) e Z é a impedância acústica, dada em ($\text{kg/m}^2\text{s}$).

No caso em que a onda acústica atravessa dois meios fluidos com impedâncias diferentes ocorrem os fenômenos de reflexão e transmissão (figura 2.2).

Figura 2.2 – Fenômenos de transmissão e reflexão de ondas acústicas incidentes em uma interface entre dois meios fluidos. Note que o ângulo da onda incidente com a interface é igual ao ângulo da onda refletida ($\theta_i = \theta_r$).

Considerando R como sendo o coeficiente de reflexão. Onde R é dado pela razão entre a amplitude da onda refletida (P_r) e a amplitude da onda incidida (P_i), fica (KINSLER et al,1982):

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad (2.3)$$

Na equação nota-se que o coeficiente de reflexão depende tanto da impedância dos meios (Z_1 e Z_2) como dos ângulos de incidência (θ_i) e transmissão (θ_t). Notar que para uma superfície plana $\theta_i = \theta_r$. Já o coeficiente de transmissão T é o complemento de R e pode ser dado por:

$$T = 1 - R \quad (2.4)$$

2.1.3 Atenuação do sinal acústico.

A atenuação do sinal acústico é um fenômeno que ocorre quando a onda acústica está se propagando em um meio material. Basicamente este fenômeno está relacionado com o decaimento da intensidade do sinal acústico conforme há um afastamento deste da fonte emissora (KINO, 1987).

A atenuação do sinal acústico em função do deslocamento da onda pode ser produzida principalmente por perdas devido a:

- Fatores térmicos: Devido à propagação de uma onda mecânica como a acústica, há regiões de compressão onde ocorre aumento de pressão e temperatura e há regiões de expansão, onde ocorre a diminuição de pressão e de temperatura. Assim, surge um fluxo de energia na forma de calor que acaba por amortizar a propagação da onda.
- Viscosidade do meio: Através do atrito entre a onda acústica e as partículas do meio há perda de energia. Este tipo de dissipação de energia só faz sentido ao falarmos de meios fluídicos já que os sólidos praticamente não apresentam viscosidade.
- Imperfeições dos gases: Como os gases não são perfeitos, surgem diversos fatores que acabam por atenuar a propagação da onda, como a composição mista dos gases, transferência de energia de translação em energia de rotação ou vibração interna da molécula, conhecida como relaxação.

O coeficiente de atenuação de um sinal acústico é dado por:

$$\alpha = af^b \quad (2.5)$$

Onde α é o coeficiente de atenuação dado em (Db/cm), a é o coeficiente de atenuação em 1MHz, f é a frequência em (Hz) e b é o coeficiente de dependência entre f e α . Na equação 2.5 a dependência direta da atenuação com a frequência fica evidenciada.

Utilizando este valor de α é possível obter o campo de pressão acústica $P(r,t)$ em um ponto r distante da fonte.

$$P(r,t) = P_0(r,t) \cdot e^{-\alpha r} \quad (2.6)$$

Na equação 2.6 P_0 é o campo de pressão emitido pela fonte, r é a distância de propagação.

2.2 Modelagem da membrana.

2.2.1 Modelagem Estática.

A membrana do CMUT pode ser modelada estaticamente considerando uma carga uniforme q (no caso a pressão atmosférica) sobre ela. Será adotado inicialmente o modelo analítico proposto por Timoshenko (YOUNG; BUDYNAS, 2002). A carga será aplicada em toda a superfície de uma das faces da membrana e na parte inferior será considerado vácuo. Além disso, a borda da membrana está engastada. Como é mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Ilustração da carga q (indicada pelas setas) distribuída na superfície da membrana circular de diâmetro d e espessura t . Esta carga q representa a pressão atmosférica.

Considerando que a membrana tem um módulo de elasticidade E , um coeficiente de Poisson ν e utilizando as condições para aplicação das equações listadas em Young e Budynas (YOUNG; BUDYNAS, 2002) encontra-se a deflexão analítica da membrana. As aproximações são: A membrana deve ser plana, ter espessura uniforme, o material deve ser homogêneo e isotrópico, a espessura deve ter no máximo 25% do diâmetro, a deflexão máxima deve ser menor que pelo menos a metade da espessura, todas as forças são normais à membrana e a membrana deve estar engastada em toda sua borda e com vácuo na outra face. A deflexão da membrana pode ser encontrada por:

$$y(r) = y_c + \frac{M_c r^2}{2D(1 + \nu^2)} - \frac{q r^4}{64D} \quad (2.9)$$

Aqui r é a distância variável do centro da membrana até sua borda, $y(r)$ é a deflexão em função de r , y_c é a deflexão máxima (encontrada no centro da membrana), M_c é o momento fletor central, D é a rigidez de flexão da membrana ν é o coeficiente de Poisson do material da membrana e q a carga. As equações (2.10), (2.11) e (2.12) abaixo mostram como foram obtidos D , y_c e M_c .

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2.10)$$

$$y_c = -\frac{q a^4}{64D} \quad (2.11)$$

$$M_c = \frac{q a^2(1 + \nu)}{16} \quad (2.12)$$

Os outros parâmetros utilizados são: a espessura da membrana t e o raio da membrana a . Com a equação (2.9), é possível plotar o perfil de como a membrana se deformará com a pressão atmosférica. Os resultados obtidos com esse modelo podem ser utilizados como parâmetros iniciais da construção de um modelo computacional. Com isso o tempo gasto com simulações pelo método dos elementos finitos é drasticamente diminuído. De qualquer modo, a construção de um modelo computacional próximo ao modelo analítico é necessária para a correta

avaliação dos resultados e detecção de erros entre as modelagens. O modelo computacional que simulará o CMUT é de uma membrana sob as mesmas condições (geometria, material e restrições de movimento) do modelo analítico.

2.2.2 Modelagem Modal

A principal função da análise modal é obter os modos naturais de vibração da membrana do CMUT (TANAKA; et al, 2009). Estes modos de vibração são obtidos a partir da excitação da estrutura em análise por ondas de diversas frequências. Quando a onda de excitação entra em ressonância com a vibração da estrutura, foi encontrado seu modo de vibração natural (CRETU; ROHLING, 2011). Para cada tipo de estrutura existe um conjunto destas frequências que é único. Em cada uma destas frequências a estrutura vibra de um modo diferente. Esses modos de vibrar são conhecidos como primeiro modo, segundo modo, terceiro modo e assim por diante. Cada um destes modos é obtido por uma frequência específica.

Na figura 2.4 estão mostrados os três primeiros modos de vibrar de uma membrana circular engastada nas bordas, assim como no modelo utilizado para a membrana do CMUT. Para uma placa circular, os modos são identificados por dois números no padrão (n,m) , onde n é o número de nodos que são diametrais à placa e m é o número de nodos circulares e esta notação foi proposta por Ernst Chladni (LEISSA, 1969). O primeiro modo é o $(0,1)$, o segundo é $(1,1)$ e o terceiro $(2,1)$.

Figura 2.4 – Três primeiros modos de vibrar de uma membrana circular engastada na borda. O primeiro modo é o $(0,1)$, o segundo é $(1,1)$ e o terceiro $(2,1)$.

A determinação dos modos de vibração da membrana é de extrema importância, já que, é a partir destes resultados que a frequência da onda alternada será determinada.

Para uma membrana circular engastada nas bordas as frequências de vibração para os três primeiros modos ($f_{0,1}, f_{1,1}, f_{2,1}$) podem ser obtidos analiticamente por (ROSSING; FLETCHER, 1994):

$$f_{0,1} = 0,4694 C_l \frac{t}{d^2} \quad (2.13)$$

$$f_{1,1} = 2,08 f_{0,1} \quad (2.14)$$

$$f_{2,1} = 3,41 f_{0,1} \quad (2.15)$$

Em (2.13) t é a espessura, d o diâmetro e c_l é a velocidade de propagação da onda longitudinal na membrana que pode ser encontrado por (2.16). Onde E é o modulo de Young, ν é o coeficiente de Poisson e ρ é a densidade da membrana.

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (2.16)$$

No capítulo 3 (seção 3.1.2) estão mostrados os resultados da análise modal feita pelo Método Analítico. E no mesmo capítulo 3 (seção 3.2.3) estão mostrados os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos para as diferentes configurações de membrana.

2.3 Eletromecânica.

2.3.1 Capacitores de placas paralelas.

O princípio de funcionamento de um MEMS capacitivo pode ser entendido através do estudo dos capacitores. Basicamente um capacitor é um componente elétrico capaz de armazenar cargas elétricas (ALLEN, 2005). A figura 2.5 ilustra um

capacitor de placas paralelas onde a placa condutora superior de área A é separada da placa condutora inferior, também de área A , por um material dielétrico com permissividade elétrica (ϵ) e espessura (g).

Figura 2.5 – Capacitor de placas paralelas. A placa superior está separada da placa inferior por um dielétrico de espessura g . A fonte DC, representada por V , é usada para eletrizar as placas. No caso do CMUT também pode ser usada para aproximar as placas aumentando assim a capacitância.

O valor da capacitância deste capacitor é dado pela equação (2.17). Na equação, C é a capacitância dada em Farad (F), A é a área das placas dada em m^2 e ϵ é a permissividade elétrica do dielétrico dada em F/m (para o vácuo $\epsilon = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m e para o ar $\epsilon = 8,84 \times 10^{-12}$ F/m), f é o fator de forma e g é a altura da cavidade da em metros.

$$C \propto \frac{\epsilon A}{g} f \quad (2.17)$$

A energia (W) de um capacitor quando submetido a uma tensão de polarização V , é dada por:

$$W = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{g} V^2 \quad (2.18)$$

Onde W é medida em Joules (J) e V em volts (V).

O valor da força eletrostática entre as placas pode ser obtido diferenciando a energia na direção da força. Considerando a força na direção z teremos:

$$\frac{\partial W}{\partial z} = F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{g^2} V^2 \quad (2.19)$$

Na expressão F é a força eletrostática, dada em Newtons (N).

Pela expressão é fácil notar que a força eletrostática entre as placas é diretamente proporcional ao quadrado da tensão aplicada e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as placas.

2.3.2 Polarização do CMUT

O CMUT necessita de uma tensão de polarização DC (VDC) para que possa operar (ERGUN, et al, 2005). Esta tensão VDC é necessária, pois além de eletrizar o CMUT, causa uma aproximação entre a membrana e a cavidade, diminuindo a altura da cavidade e aumentando a rigidez da membrana. Devido à aproximação ocorre o tensionamento da membrana, com isso, a vibração da membrana é facilitada. Isso se dá, pois, tensionada, a membrana possui uma amplitude de vibração menor, o que gera menos perdas por amortecimento. A força de atração eletrostática ($F_{\text{elétrica}}$) entre os eletrodos, que são a membrana e eletrodo inferior, gera o surgimento de forças elásticas ($F_{\text{elástica}}$) na membrana (ver figura 2.6(B)). Além disso, a aplicação da tensão de polarização DC gera uma aproximação entre o centro da própria membrana e o eletrodo inferior do CMUT, o que aumenta a capacitância do dispositivo. Na figura 2.6 o efeito de aproximação é mostrado por g_1 e g_2 onde g_1 é sempre maior que g_2 . No presente trabalho o efeito do colapso não é desejado, pois causará um curto circuito no CMUT, este efeito ocorre quando $g=0$.

Figura 2.6 – Estruturas do CMUT. Em (A) o CMUT não está polarizado já em (B) o efeito da polarização é mostrado.

A aplicação da tensão de excitação AC (VAC) no CMUT irá gerar a vibração da membrana, que terá sua frequência de vibração determinada pela frequência da

tensão VAC. Para aplicar essa tensão é necessário acoplar a tensão da fonte AC com a tensão de polarização DC (acoplamento AC-DC). Para isto foi utilizado o arranjo da Figura 2.7.

Figura 2.7 – Circuito de acoplamento AC-DC.

Aplicando a configuração da figura 2.9 no CMUT a referência de tensão sobre ele será o VDC e o VAC variará sobre esta referência. A figura 2.8 ilustra como é a forma de onda sobre o CMUT.

Figura 2.8 – Representação da forma de onda aplicada sobre o CMUT quando este está submetido ao acoplamento AC-DC.

A tensão VDC de polarização tem um valor crítico, denominada tensão de colapso (ORALKAN, et al, 2006) e (MENDONÇA, 2013). Se a tensão VDC aplicada for muito intensa a tensão mecânica sucumbe causando um relaxamento definitivo na placa. A equação 2.20 mostra como o valor da tensão de colapso é obtido.

$$V_{coll} = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\epsilon_0 A}} \quad (2.20)$$

Na equação V_{coll} é a tensão de colapso, k é a constante elástica da membrana, A é a área da membrana, g_0 é a largura inicial da cavidade e ε_0 é a permissividade do ar.

2.4 Método dos elementos finitos.

Os problemas de física e de engenharia são descritos matematicamente através de equações diferenciais. As soluções destas equações fornecem o resultado daquele determinado problema. Porém devido à complexidade de alguns problemas práticos, nem sempre é possível a determinação analítica das equações diferenciais que os descrevem. Nestes casos deve-se aplicar algum método numérico de resolução de equações diferenciais. Dentre estes métodos se destaca o MEF (método de elementos finitos).

O método de elementos finitos (MEF) pode ser considerado uma forma de resolução de problemas de contorno e pode ser aplicado em diversos ramos da engenharia (HUTTON, 2004). Basicamente o método está baseado na divisão de um grande domínio em domínios menores cuja soma dos resultados fornecerá o resultado global, esta divisão também pode ser denominada discretização do domínio (LOTTI; et al, 2006). O MEF será utilizado na definição das dimensões que os dispositivos CMUTs deverão ser fabricados. Estas dimensões serão baseadas nos resultados obtidos com as simulações estáticas. O MEF também será usado na análise modal, fornecendo resultados referentes à frequência de operação do dispositivo CMUT.

Para estas análises será utilizado o software de elementos finitos ANSYS 10.0 (ANSYS, 2014). Basicamente uma simulação no ANSYS pode ser dividida em três partes: Pré-processamento, nesta etapa são definidos os parâmetros dimensionais e as características físicas dos materiais que serão utilizados na simulação. A segunda parte é a escolha da solução, onde são definidos os tipos de soluções que se deseja obter com a simulação. Por exemplo, análise estática, análise modal, análise harmônica. E por fim o pós-processamento onde os resultados desejados de cada uma das análises realizadas são obtidos.

2.5 Métodos de fabricação.

Basicamente, dois métodos de fabricação são utilizados com maior sucesso na fabricação do CMUT. O primeiro é o método por corrosão de camada sacrificial (JIN; et al, 1998). Já o segundo método utilizado é conhecido como *wafer-bonding* (HUANG; et al, 2003).

No método por corrosão sacrificial basicamente a cavidade é formada a partir da retirada de uma camada sacrificial pré-depositada. Já no processo por *wafer-bonding* a cavidade e a membrana são produzidas em substratos separados e depois é feita uma colagem destes dois elementos. Ambos os processos utilizam algumas técnicas de fabricação que serão detalhadas a seguir.

2.5.1 Deposição de materiais.

Existem diversos métodos de deposição de materiais, sendo que estes métodos podem ser divididos em processos químicos e físicos, ambos podem ser à base de vapor ou não. Basicamente a deposição de materiais consiste na criação de uma camada de material sobre outro material (SZE, 1988). Dentre os processos físicos de deposição de vapor, conhecidos como PVD (*Physical Vapor Deposition*, deposição física a vapor), são destaques: O *Sputtering* (OLIVEIRA, 2005) e a evaporação térmica. Já os principais processos químicos de deposição de vapor, conhecidos como CVD (*Chemical Vapor Deposition*, deposição química a vapor) são: O PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) e o MOCVD (*Metal-organic Chemical Vapor Deposition*) (LOBONTIU; GARCIA, 2005). Outros processos como a eletrodeposição e principalmente o *spin-coating* (SENTURIA, 2000) merecem destaque.

O *spin-coating* é um dos métodos de deposição que foi mais utilizado neste trabalho. *Spin-coating* consiste em distribuir o material a ser depositado na superfície do substrato pela ação da força centrífuga. Este processo é muito utilizado na

deposição dos fotorresistes, pois estes normalmente são materiais poliméricos com viscosidade média, o que facilita a ação da força centrífuga. Os fotorresistes são materiais centrais em todo processo de fabricação, já que é a partir deles que todo o dispositivo é formado através da técnica de fotolitografia.

2.5.2Fotolitografia.

O processo de fotolitografia (SZE, 1988) consiste na transferência de um padrão de imagem de uma máscara para o dispositivo que será fabricado. A fotolitografia inicia-se após a deposição do fotorresiste. O fotorresiste é um polímero sensível à luz, com isso, utilizando-se de uma máscara é possível a sensibilização de parte do fotorresiste. Esta parte do fotorresiste sensibilizada pela luz pode ser retirada ou mantida, dependendo do tipo de fotorresiste. Com isso, é possível transferir o padrão da imagem da máscara para o fotorresiste. Com o padrão da máscara no fotorresiste é possível corroer parte do dispositivo, formando, assim, a estrutura desejada.

2.5.3 Micro-usinagem (corrosão).

Esta etapa do processo consiste na corrosão ou retirada de parte do material. Isto é necessário para a formação da estrutura desejada (GAD-EL-HAK, 2001). Da mesma forma que a deposição, a corrosão pode ser feita fisicamente ou quimicamente. Um exemplo de corrosão física é pelo método de bombardeamento de íons. Porém os métodos químicos foram mais utilizados no presente trabalho. Dentre os métodos de corrosões químicas, existem os *wet etching* e os *dry etching*, sendo conhecidos como corrosões úmidas e secas, respectivamente. Outro fator importante a ser considerado é o tipo de corrosão, que pode ser anisotrópica, neste caso a corrosão se dá igualmente em todas as direções, ou isotrópicas, onde a

corrosão se dá preferencialmente em uma direção determinada pela orientação cristalográfica do material reagente.

2.5.4 Prototipagem de PCI a laser.

O processo de prototipagem ou usinagem de placas de circuitos impresso (PCI) a laser é relativamente novo e se mostra bastante promissor em muitas outras áreas além da produção de PCIs. Basicamente, o processo se limita a desenhar o leiaute que se deseja usinar e após o transferir para a máquina. Através de movimentação de eixos controlados por comandos do tipo CNC a prototipadora irá desenhar o leiaute na superfície desejada.

No presente trabalho foi utilizada em alguns processos a prototipadora *Protolaser U3* da fabricante *LPKF laser and electronics* (LPKF, 2014). Esta máquina possui um laser de diodo que pode chegar a resoluções de feixe de até 15 μ m, sendo que seu comprimento de onda é de 355nm, a potência do laser pode chegar a 6W. O que, para a fabricação dos dispositivos propostos nesta tese, é bem mais que suficiente.

2.6 Ensaios não destrutivos.

Ensaios não destrutivos (END) são definidos como sendo um conjunto de técnicas utilizadas no controle de qualidade de produtos e em manutenção de máquinas e equipamentos. Estes ensaios visam o incremento da qualidade e confiabilidade de produtos, máquinas e equipamentos. Seu uso não prejudica o funcionamento ou danifica o que está sendo analisado (ABENDI, 2014). Os principais ensaios não destrutivos utilizados atualmente são: Análise de vibrações,

líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom, radiografia e termografia. O CMUT proposto nesta tese poderá ser potencialmente aplicado em duas destas técnicas, são elas: Análise de vibrações e ultrassom.

2.6.1 Análise de vibrações.

A análise de vibrações em máquinas e equipamentos tem hoje um papel importante dentro da manutenção industrial (SKF, 2014). Uma máquina ideal deve manter sua vibração dentro de faixas adequadas de frequência (ISO 10816-3, 1998). Mas elas podem apresentar diferenças nestas frequências devido a desgastes, má utilização, falta de correta manutenção e etc.

Normalmente uma máquina possui um espectro de vibração bem definido se seus parâmetros de funcionamento estiverem corretos. Devido a isto é possível, através da análise deste espectro, saber se a máquina apresenta algum tipo de problema. Se o espectro medido for diferente do ideal é provável que algum parâmetro esteja desregulado (HARRIS, 1966).

Os manuais de manutenção das máquinas fornecem informações do que fazer caso algumas das frequências não estiverem de acordo com o especificado. Por exemplo, se a medição de frequência em um determinado rolamento não estiver adequada sugere-se a lubrificação ou até mesmo a substituição deste rolamento. Com isso, é possível antecipar possíveis quebras de componentes o que minimiza o tempo de paradas não programadas de máquina para realização de manutenção corretiva.

Atualmente a análise de vibração é feita com uso de acelerômetros piezelétricos. Como os CMUTs podem captar sinais acústicos (modo recepção) nas faixas de frequência de vibração de máquinas eles podem ser potencialmente aplicados neste tipo de ensaio.

2.6.2 Ultrassom

O ensaio não destrutivo por ultrassom baseia-se no método de pulso-eco (KINSLER, 1982). Neste método um transdutor emite uma onda acústica de alta frequência (pulso). Após esta onda atingir o elemento a ser analisado, ocorre a sua reflexão (eco). Esta onda refletida é captada pelo mesmo transdutor, agora operando no modo de recepção.

Este ensaio permite, por exemplo, a verificação de falhas estruturais em materiais, já que a onda emitida pode colidir com a falha refletindo assim um sinal acústico não esperado (SZABO, 2004). Além disso, o ensaio não destrutivo por ultrassom pode ser aplicado em medição de espessuras, medição de distância e medição de nível.

CAPÍTULO 3: MODELAGEM.

3.1 Modelagem Analítica.

3.1.1 Modelagem analítica da membrana.

Inicialmente foi feita a análise da membrana do dispositivo CMUT utilizando o modelo proposto por Timoshenko (YOUNG; BUDYNAS, 2002). Neste modelo, foi considerada membrana circular com diâmetro d e espessura t engastada nas bordas (figura 3.1). O modelo permite a análise da membrana sob a ação da pressão atmosférica q em uma das faces e vácuo na outra.

Figura 3.1 – Modelo da membrana utilizado nas simulações estáticas. A espessura é representada pela letra t , o diâmetro pela letra d e a carga aplicada é representada por q (baseada em YOUNG-BUDYNAS, 2002)

O principal dado que esta análise traz é quanto será a deflexão máxima da membrana quando submetida à pressão atmosférica em uma das faces e com vácuo na outra, o valor da pressão utilizado na análise foi $q = 101,325\text{KPa}$. Os parâmetros de controle da deflexão são a própria espessura e o diâmetro da

membrana. O modelo ainda leva em consideração as propriedades mecânicas módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν). Os materiais que foram utilizados nessa análise são: O silício, SU-8, PDMS e o cobre. O silício e o cobre são materiais rígidos; o SU-8 é um polímero de rigidez média; e o PDMS é um polímero flexível. Assim, o uso de diversos tipos de materiais fica representado. Na tabela 3.1 os valores dos parâmetros mecânicos desses materiais são mostrados.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do silício, SU-8, PDMS e cobre.

Material	Módulo de Young (E)	Coeficiente de Poisson (ν)	Densidade (kg/m^3)
Silício	127Gpa	0,278	2330
SU-8	4,2 Gpa	0,220	1190
PDMS	0,75Mpa	0,500	970
Cobre	130 Gpa	0,340	8920

Cada um dos materiais foi analisado em 10 valores diferentes de diâmetro e cada diâmetro foi analisado em 10 espessuras diferentes, totalizando 100 amostras. Lembrando que o valor limite da espessura não pode ultrapassar 25% do valor do diâmetro e que a deflexão máxima não pode ultrapassar metade da espessura (YOUNG; BUDYNAS, 2002), como descrito anteriormente. O intuito foi obter o maior número possível de deflexões. Os valores de deflexão que respeitarem as condições serão considerados válidos. A tabela 3.2 mostra todos os pontos simulados, todos os resultados foram obtidos a partir de um programa feito no software *Matlab 6.0* (MATSUMOTO, 2001).

Tabela 3.2 – Valores bases de diâmetro e espessura que foram utilizados na simulação para os quatro materiais da membrana.

Diâmetro (μm)	Espessura (μm)									
100	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
200	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
300	7,5	15	22,5	30	37,5	45	52,5	60	67,5	75
400	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
500	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5	100	112,5	125
600	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
700	17,5	35	52,5	70	87,5	105	122,5	140	157,5	175
800	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
900	22,5	45	67,5	90	112,5	135	157,5	180	202,5	225
1000	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250

A partir destes valores foram levantadas curvas que mostram o comportamento destes materiais (Gráfico 3.1). Três dos materiais analisados mostraram-se promissores nessa análise em praticamente todos os pontos analisados. Porém o PDMS teve deflexões muito acentuadas nas baixas espessuras, o que torna seu uso nesta condição inviável. Já para espessuras maiores ele até pode ser usado como membrana. Porém, uma análise mais criteriosa foi feita e será mostrada adiante. O silício e o cobre tiveram resultados bem próximos e mostram-se adequados em todos os pontos. O SU-8 teve deflexões maiores, principalmente considerando os valores de espessura da primeira coluna da tabela 3.1. Mas, para valores de espessuras maiores o SU-8 mostrou-se dentro da faixa adequada. Esses resultados serão utilizados como valores iniciais na análise computacional.

Gráfico 3.1 – Curvas de análise da deflexão máxima da membrana em função da espessura e diâmetro da membrana.

3.1.2 Modelagem analítica modal.

A modelagem modal é importante, pois é a partir dela que as frequências dos modos de vibração das membranas serão determinadas. Estas frequências serão

utilizadas como referências para a aplicação da tensão de excitação alternada no CMUT (KUPNIK; et al, 2008). Outro resultado que a análise modal mostra, diz respeito à faixa de frequência que o dispositivo poderá ser aplicado. Caso a frequência seja alta, a distância do dispositivo do objeto a ser analisado deve ser curta, pois a atenuação é grande. Se, por outro lado, a frequência for menor a distância do objeto em análise pode ser maior, já que, a atenuação é menor. Mas, em aplicações médicas, por exemplo, a alta frequência ajuda na resolução da imagem.

Para a determinação dos modos de vibração foi utilizado um programa feito no software *Matlab 6.0*. O programa foi obtido a partir das equações de 2.13 a 2.16 mostradas no capítulo 2 deste trabalho.

Basicamente, a frequência de vibração dos modos depende dos parâmetros mecânicos da membrana e da sua dimensão (espessura e diâmetro). Com isso, foram feitas as análises utilizando os mesmos valores de propriedades mecânicas constantes na tabela 3.1 e os valores de dimensão utilizados são os mostrados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dimensões das membranas utilizadas.

Silício e cobre			SU-8			PDMS	
d (μm)	t (μm)		d	t (μm)		d (μm)	t (μm)
100	2,5	17,5	100	5	25	100	25
400	10	70	400	20	100	400	100
800	20	140	800	40	200	800	200

No gráfico 3.2 os resultados são mostrados. É possível dizer que para valores maiores de diâmetro e menores de espessura a frequência dos modos de vibração são mais baixas. Isso vale para todos os materiais. Além disso, como previsto, a frequência do primeiro modo é menor. Outro resultado interessante diz respeito às curvas obtidas para o SU-8 e para o PDMS que apresentaram também menores valores de frequência se comparados com o silício e cobre essa diferença se deve basicamente ao módulo a diferença na densidade destes materiais, que é menor para o PDMS e SU-8. Mais um resultado relevante foi a diferença observada entre o silício e o cobre. As frequências de vibração do cobre são praticamente a metade das do silício. Isso também se deve a diferença entre a densidade dos dois

materiais. A partir destas análises é possível dizer que o silício é mais adequado para ser usado em aplicações que demandem alta frequência, já o cobre, o SU-8 e o PDMS podem ser aplicados em frequências mais baixas. Esses resultados serão utilizados como valores iniciais na análise computacional.

Gráfico 3.2 – Análise analítica modal. De (a) a (c) são mostrados os resultados dos três modos para membrana de Si em duas espessuras diferentes para cada valor de diâmetro. De (d) a (f) os resultados para o cobre são mostrados e de (g) a (i) os resultados para o SU-8. Por último os resultados para o PDMS são mostrados de (j) a (l).

3.2 Modelagem Computacional.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta muito poderosa utilizada em análises de problemas de engenharia. Inicialmente o MEF foi usado na

resolução de problemas de engenharia de estruturas e engenharia mecânica. Porém, hoje em dia ele é utilizado nas mais diversas áreas da engenharia, inclusive em elétrica e eletromecânica (SADIKU, 2004).

No presente trabalho o MEF foi utilizado principalmente em análises estáticas (KUPNIK; et al, 2006) e modais (KUPNIK; et al, 2008). No que diz respeito às análises estáticas o MEF foi utilizado sob duas condições. Na primeira a membrana foi submetida sob a ação da pressão atmosférica, assim como no método analítico de análise estática. Já no segundo caso, o MEF estático foi utilizado na determinação da deflexão máxima da membrana quando esta está submetida à ação da pressão atmosférica somada com a ação imposta por uma tensão de polarização DC (HUANG et al, 2006). Estes resultados são importantes, já que valores muito altos de tensão de polarização podem causar o colapso do CMUT (ORALKAN; et al, 2006) e valores muito baixos podem não fornecer um tensionamento mecânico adequado à membrana antes da aplicação da tensão AC. Foram utilizados os valores obtidos na análise analítica como norteador da análise por MEF para reduzir o tempo de processamento.

A seguir os resultados obtidos serão apresentados. Inicialmente serão mostrados os resultados obtidos com a simulação estática nas duas condições. E após os resultados da análise modal também estão mostrados.

3.2.1 Modelo de análise estática da membrana: Membrana sob ação da pressão atmosférica.

O modelo computacional foi construído no software comercial de MEF Ansys (ANSYS 10.0, Ansys Inc., Canonsburg, PA.). As membranas são modeladas tridimensionalmente, o que garante uma boa precisão nos resultados (YARALIOGLU; et al, 2005). Foram construídos cilindros de diâmetros d (em μm) e espessuras t (em μm), (figura 3.2), assim como o modelo mostrado na figura 3.1. Em

seguida o cilindro foi discretizado, obtendo assim a malha de elementos finitos que foi analisada para cada caso (figura 3.2(b)).

Figura 3.2 – Cilindros usados na análise por MEF. Em (a) pode-se ver o cilindro. Já em (b) vê-se o mesmo cilindro discretizado.

O elemento base utilizado para a formação da membrana é um sólido tetraédrico próprio da biblioteca do software Ansys denominado SOLID92.

Após a discretização, o movimento dos nós da borda, da face inferior do cilindro é restringido nas três direções, isso faz com que a membrana seja engastada nas bordas. Após a definição e formação da estrutura, foi feita a análise estática da deflexão da membrana sob a ação da pressão atmosférica.

O valor da pressão atmosférica utilizado foi de $q = 101,325$ KPa, o mesmo utilizado no estudo analítico. Nesta simulação os mesmos valores que constam na tabela 3.2 foram utilizados para o Si e para o cobre. Para o SU-8 a primeira coluna de espessuras da tabela 3.2 foi desconsiderada, pois nestes valores a deflexão foi muito elevada. Já o PDMS só pode ser simulado nos valores que constam na tabela 3.4. Isso se deve ao fato de que para espessuras pequenas a deflexão no PDMS é muito grande o que acabou gerando inconsistências numéricas na simulação.

Tabela 3.4 – Valores base de diâmetro e espessura que foram utilizados na simulação para o PDMS.

Diâmetro (μm)	Espessuras (μm)				
100	15	17,5	20	22,5	25
200	30	35	40	45	50
300	45	52,5	60	67,5	75
400	60	70	80	90	100
500	75	87,5	100	112,5	125
600	90	105	120	135	150
700	105	122,5	140	157,5	175
800	120	140	160	180	200
900	135	157,5	180	202,5	225
1000	150	175	200	225	250

A partir dos dados das tabelas 3.2 e 3.4 foram levantadas as curvas de deflexão máxima em função da espessura e do diâmetro para os 4 materiais que estão sendo analisados (gráfico 3.3). Foi possível comprovar que o Si e o cobre podem ser utilizados como membrana para todos os valores simulados. O SU-8 também apresentou bons valores de deflexão se comparados com o cobre e com o silício para os diâmetros e espessuras utilizados na simulação.

Já o PDMS teve uma deflexão um pouco mais elevada do que a apresentada no modelo analítico de análise estática, o que praticamente o inviabiliza para ser utilizado como membrana nas condições propostas. Porém, posteriormente será feita a mesma análise com a inclusão da aplicação da tensão de polarização sobre a membrana. Este fato irá causar um incremento na deflexão, o que confirmará os resultados obtidos até agora para o PDMS.

Gráfico 3.3 – Curvas de análise da deflexão máxima da membrana em função da espessura e diâmetro feito pelo método de elementos finitos.

Além das curvas que resumem os resultados obtidos, serão apresentadas algumas figuras obtidas no próprio software ANSYS 10.0. As figuras que serão mostradas são aquelas cujos materiais possuem a maior espessura e o maior diâmetro. Nesta situação o tempo de processamento é maior, devido à alta complexidade da malha de elementos finitos. Também serão mostradas as figuras obtidas na situação oposta, onde os diâmetros e as espessuras são menores. Todos os resultados estão mostrados nas figuras de 3.3 a 3.6. E os valores obtidos estão resumidos na tabela 3.5.

Figura 3.3 – Resultados obtidos no software ANSYS 10.0 para a deflexão da membrana de Si. Os resultados são para as condições de espessura e diâmetros mostrados na figura.

Figura 3.4 – Resultados obtidos no software ANSYS 10.0 para a deflexão da membrana de cobre. Os resultados são para as condições de espessura e diâmetros mostrados na figura.

Figura 3.5 – Resultados obtidos no software ANSYS 10.0 para a deflexão da membrana de PDMS. Os resultados são para as condições de espessura e diâmetros mostrados na figura. O valor inicial de espessura mudou, pois com apenas $2,5 \mu\text{m}$ a deflexão do PDMS é muito elevada o que gera inconsistências nos resultados.

Figura 3.6 – Resultados obtidos no software ANSYS 10.0 para a deflexão da membrana de SU-8. Os resultados são para as condições de espessura e diâmetros mostrados na figura. Assim como no PDMS a espessura inicial foi aumentada.

Tabela 3.5 – Resultados obtidos através da simulação pelo método dos elementos finitos. Aqui t é a espessura e d o diâmetro da membrana. Os valores negativos de deflexão expressam que esta está se dando no sentido negativo do sistema de referência.

MATERIAL	t (μm)	d (μm)	DEFLEXÃO MÁXIMA (μm)
Silício	2,50	100	- 0,054903
Silício	250	1000	- 0,001146
Cobre	2,50	100	- 0,050906
Cobre	250	1000	- 0,011080
PDMS	15,0	100	- 48.76600
PDMS	250	1000	- 177.0560
SU-8	5,0	100	- 1,720000
SU-8	250	1000	- 0,035001

A partir dos resultados obtidos com as simulações pelo método analítico de análise estática e pelo MEF, constata-se que membranas de silício e cobre podem ser construídas com os valores indicados na tabela 3.6. Já as membranas de SU-8 podem ser construídas com os valores da tabela 3.7. E o PDMS apresentou resultados relativamente satisfatórios apenas nas dimensões mostradas na tabela 3.8. Porém, outras análises serão feitas antes da determinação dos valores ideais para a fabricação.

Com base nos valores destas tabelas, serão mostrados, logo no tópico a seguir, resultados referentes à modelagem da membrana sob ação da pressão atmosférica somada à tensão de polarização. Todos os resultados referentes a esta modelagem serão obtidos no software ANSYS 10.0 com o auxílio do elemento TRANS-126, que será explicado adiante. Esses resultados definirão quais serão os materiais utilizados no seguimento do trabalho e também quais dimensões serão utilizadas na fabricação da membrana do CMUT.

Tabela 3.6 – Dimensões da membrana que podem ser fabricadas considerando o material sendo o Silício e o Cobre.

d (μm)	t (μm)
100	2,5 – 25
200	5 – 50
300	7,5 – 75
400	10 – 100
500	12,5 – 125
600	15 – 150
700	17,5 – 175
800	20 – 200
900	22,5 – 225
1000	25 – 250

Tabela 3.7 – Dimensões da membrana que podem ser fabricadas considerando o material sendo o SU-8.

d (μm)	t (μm)
100	5 – 25
200	10 – 50
300	15 – 75
400	20 – 100
500	25 – 125
600	30 – 150
700	35 – 175
800	40 – 200
900	45 – 225
1000	50 – 250

Tabela 3.8 – Dimensões da membrana que podem eventualmente serem fabricadas considerando o material sendo o PDMS.

d (um)	t (um)
100	25
200	50
300	75
400	100
500	125
600	150
700	175
800	200
900	225
1000	250

3.2.2 Modelo de análise estática da membrana: Membrana sob ação da pressão atmosférica somada a tensão de polarização DC.

O modelo proposto a seguir foi utilizado na simulação do comportamento da membrana do CMUT quando esta está submetida à ação da pressão atmosférica somada à tensão de polarização DC em uma das faces e vácuo na outra face. No modelo temos a membrana de espessura t e diâmetro d engastada na borda, assim como no modelo anterior. Porém, para produzir o efeito de deslocamento com a aplicação de tensão elétrica será necessário o uso do elemento da biblioteca do ANSYS 10.0 denominado TRANS-126 (YARALIOGLU; et al, 2005).

O elemento TRANS-126 possui características eletromecânicas e em cada nó da malha de elementos finitos será inserido um deles. Com isso toda a área da superfície interior da membrana poderá ser simulada. O elemento TRANS-126 utilizado possui um comprimento g , que nada mais é do que a altura inicial da cavidade do CMUT. A figura 3.7 mostra o modelo. Nela vemos a membrana engastada na borda, na parte inferior vemos os nós criados como referência e interligando o nó inferior ao nó da membrana existe o elemento TRANS-126.

Figura 3.7 – Modelo utilizado na simulação do comportamento da membrana do CMUT quando esta está submetida à ação da pressão atmosférica somada à tensão de polarização DC. O modelo mostra a membrana de espessura t e diâmetro d engastada na borda. Mostra também os elementos eletromecânicos TRANS-126 que possuem um tamanho g (espessura da cavidade) e interligam os nós da membrana (nó superior) com nós inferiores de referência. Baseado em (MENDONÇA, 2013).

Quando a tensão DC é aplicada na membrana forças eletrostáticas surgem atraindo a membrana em direção ao fundo da cavidade, os aproximando (WONG, 2006). Se a tensão de polarização DC aplicada for muito intensa, para o tipo de membrana que está sendo analisada, a membrana pode encostar-se ao fundo da cavidade criando o chamado colapso do CMUT (NIKOOZADEH, 2004).

A simulação do comportamento da membrana do CMUT quando esta está submetida à ação da pressão atmosférica somada à tensão de polarização DC foi feita exatamente para prever o quanto a membrana defletirá para diversos valores de tensão aplicada evitando assim que o CMUT fabricado possa entrar na região de colapso.

Para o estudo foram aplicados nos quatro materiais da membrana as tensões elétricas de 0V, 100V, 200V, 400V, 800V e 1600V. As dimensões que foram submetidas a esta análise estão na tabela 3.9. Os valores de g (espessura da cavidade) utilizados foram de 1 e 5 μm . Logo após, foram levantadas curvas da deflexão em função da espessura e da tensão elétrica aplicada para diversos diâmetros das membranas.

Tabela 3.9 – Dimensões das membranas simuladas.

Silício			Cobre			SU-8			PDMS	
d (μm)	t (μm)		d (μm)	t (μm)		d (μm)	t (μm)		d (μm)	t (μm)
100	2,5	17,5	100	2,5	17,5	100	5	25	100	25
400	10	70	400	10	70	400	20	100	400	100
800	20	140	800	20	140	800	40	200	800	200

Através dos gráficos 3.4, 3.5 e 3.6 foi possível notar que, para todos os casos as deflexões foram maiores em espessuras menores e para tensões mais elevadas. Isto comprova que a tensão de polarização DC causa uma proximidade entre a membrana e o fundo da cavidade. Além disso, foi também observado que, para uma altura da cavidade menor, a deflexão também é maior.

Os gráfico 3.4 de (a) a (c) mostram os resultados obtidos para o Si com uma espessura de cavidade de 1 μm , e de (d) a (f) são para espessura de cavidade de 5 μm . Já os gráficos 3.5 de (a) a (c) mostram os resultados para o cobre com espessura de cavidade e 1 μm , e de (d) a (f) são para membranas de cobre com

altura de cavidade de $5\mu\text{m}$. Os resultados mostram que não houve colapso em nenhuma das condições simuladas.

O gráfico 3.6 de (a) a (c) e de (d) a (f) mostram os resultados obtidos para o SU-8. Respectivamente com cavidade $g = 1\mu\text{m}$ e $g = 5\mu\text{m}$. Foi possível observar o colapso do CMUT em praticamente todos os pontos com baixas alturas. Isto se deve as propriedades mecânicas do SU-8. Já para o PDMS todos os valores colapsaram o CMUT. Este fato praticamente descartou o seu uso como possível material para ser aplicado como membrana.

Gráfico 3.4 – Mostra os resultados da análise obtidos para o Si com uma altura de cavidade de $1\mu\text{m}$ (figuras de (a) a (c)) e $5\mu\text{m}$ (figuras de (d) a (f)).

Gráfico 3.5 – Mostra os resultados da análise obtidos para o cobre com uma altura de cavidade de 1 μm (figuras de (a) a (c)) e 5 μm (figuras de (d) a (f)).

Gráfico 3.6 – Mostra os resultados da análise obtidos para o SU-8. Notar que para valores baixos de altura com exceção da figura (d), houve o colapso da membrana.

3.2.3 Análise modal da membrana.

Foi também realizada a análise modal das membranas utilizando o MEF. Os resultados foram bem similares aos encontrados na análise modal analítica. Simplesmente houve uma pequena diferença entre os valores encontrados nos dois métodos. Para a análise modal foi utilizado o modelo de Block Lanczos (FIALKO,

2003). A partir deste resultado, foi possível determinar os valores aproximados de frequência do sinal senoidal que deverão ser aplicados na membrana do CMUT. Os gráficos 3.7 mostram os resultados, os valores utilizados são os mesmos utilizados anteriormente (tabela 3.3).

Gráfico 3.7 – Análise computacional modal. De (a) a (c) é mostrado os resultados dos três modos para membrana de silício em duas espessuras diferentes para cada valor de diâmetro. De (d) a (f) os resultados para cobre são mostrados e de (g) a (i) temos os resultados para o SU-8. Por último os resultados para o PDMS são mostrados de (j) a (l).

A partir da análise modal foi possível concluir que o silício é melhor se for utilizado em aplicações que demandem alta frequência devido a sua maior rigidez. Já o cobre e principalmente o SU-8 apresentam frequência dos modos de vibração menores o que permite sua aplicação em situações que demandem baixa frequência e o PDMS apresentou frequências ainda menores, que pode ser o caso da aplicação

proposta neste trabalho. Porém, análises mais profundas serão vistas na continuidade do trabalho, principalmente nas etapas de caracterização.

No capítulo seguinte, serão mostrados os roteiros de fabricação para CMUTs com membrana de cobre, material escolhida para a continuidade do trabalho. O PDMS foi descartado devido aos maus resultados obtidos na modelagem, principalmente a alta deflexão da membrana. Já o silício possui processos bem estabelecidos, o que reduz o nível de inovação e, além disso, a faixa de frequência de atuação do silício é muito elevada e também dificuldade de fabricação com os recursos disponíveis em laboratórios de pesquisa no Brasil. O processo para o CMUT com membrana de cobre é totalmente inovador e pode abrir portas para outros metais serem testados como membrana. Além disso, diferentes materiais serão utilizados como materiais de cavidade. Alguns resultados referentes aos processos de fabricação também estão no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 4: FABRICAÇÃO.

4.1 Métodos de fabricação.

Normalmente o CMUT é fabricado pelo método de fabricação por corrosão de camada sacrificial (JIN; et al, 1998) ou pelo método de *wafer-bonding* (KWAN; et al, 2011). No método por corrosão sacrificial, basicamente a cavidade é formada a partir da retirada de uma camada sacrificial pré-depositada. Já no processo por *wafer-bonding* a cavidade e a membrana são produzidas em substratos separados e posteriormente é feita uma colagem destas duas estruturas (GOSELE; TONG, 1998).

No presente trabalho serão detalhados métodos de fabricação utilizando o processo *wafer-bonding* para criação de CMUTs com membranas de cobre. O processo de *wafer-bonding* é basicamente dividido em três partes. Criação do eletrodo inferior, formação da estrutura da cavidade e preparação e colagem da membrana (Figura 4.1).

ETAPA	Vista lateral
(a) Obtenção do eletrodo inferior
(b) Obtenção da membrana
(c) Definição da cavidade
(d) Colagem

Figura 4.1 – Mostra o processo de *wafer-bonding*. Em (a) é criado o eletrodo inferior. Já em (b) a estrutura da cavidade sobre o eletrodo inferior é mostrada. E em (c) a membrana é mostrada. E finalmente (d) mostra a estrutura final.

4.1.1 Processo para CMUT com membrana de cobre, substrato de vidro metalizado com alumínio e cavidade de SU-8.

Como alternativa aos tradicionais métodos de fabricação, foram propostos alguns processos de fabricação do CMUT com membrana de cobre. Estes métodos são inovadores e adaptados aos equipamentos existentes nos laboratórios de micro fabricação do Brasil. No primeiro processo, foi utilizado um substrato de vidro metalizado e o material da cavidade foi o SU-8. A seguir a descrição do processo é mostrada.

A princípio foi definida a estrutura dos eletrodos inferiores. Para isto, inicialmente foi depositada uma camada de alumínio sobre um substrato de vidro. Nesta etapa foi utilizada a evaporadora de filamento modelo Auto 306 – Edwards. A evaporação foi feita a uma pressão de 1×10^{-12} torr. A espessura da camada de alumínio depositada foi de aproximadamente 600nm.

Após a deposição do alumínio foram definidos os padrões através do processo de fotolitografia utilizando uma máscara similar a vista na figura 4.2 (a). Para este processo foi utilizada a alinhadora modelo AL4-2 da fabricante *Electronics Visions* CO. No processo de fotolitografia foi depositado sobre o substrato metalizado uma camada de aproximadamente 2 μ m de fotorresite positivo AZ 1518 (CLARIANT, 2014). Em seguida foi feita uma cura do fotorresiste em 100°C por 55 segundos. Logo após, foi feita a exposição, seguindo o manual o tempo foi de aproximadamente 20 segundos com radiação UV de aproximadamente 15mW/cm². Com o AZ sensibilizado foi feito a remoção do mesmo, para isto foi utilizado o revelador MIF 300 na proporção 4:1. Agora, sem o AZ sensibilizado foi então removido o alumínio utilizando a solução:

Finalmente o AZ não sensibilizado foi removido com a solução removedora. Com isso a estrutura dos eletrodos inferiores foi definida.

Com os eletrodos inferiores definidos, foi construída a estrutura da cavidade. Para esta etapa do processo foi utilizado o fotorresiste SU-8 2005 e a espessura obtida foi de $5\mu\text{m}$. Após a deposição, feita por *spin-coating*, a camada de SU-8 passa por um processo de cura a 95°C por 3 minutos. Logo em seguida o SU-8 é exposto à radiação UV (10 segundos com uma potência energética UV de 100 mJ/cm^2) e os padrões, similares aos vistos na figura 4.2(b), foram transferidos para o filme de SU-8. Após a exposição às estruturas são reveladas utilizando um removedor de SU-8 fornecido pelo fabricante (MICROCHEM, 2014). Finalmente outra cura a 95°C por 3 minutos é realizada finalizando o processo. Na figura 4.2(c) uma foto da estrutura final é mostrada.

Figura 4.2 – Em (a) a máscara utilizada para definição dos padrões dos eletrodos inferiores é mostrada. A máscara utilizada na criação das cavidades é mostrada em (b).

A figura 4.3 mostra todas as etapas utilizadas para fabricação do eletrodo inferior do CMUT. Neste processo foram produzidas amostras de cavidade com $800\mu\text{m}$, $600\mu\text{m}$ e $400\mu\text{m}$ de diâmetro. Todas as cavidades possuem uma espessura média de $5\mu\text{m}$.

Etapa	Vista lateral
1. Filme de Alumínio depositado sobre substrato de vidro por evaporação (espessura ~ 600nm)
2. Deposição de fotorresiste positivo AZ por <i>spin-coating</i> – parâmetros definidos no manual (CLARIANT, 2014)
3. Fotolitografia: Definição dos eletrodos inferiores – parâmetros definidos no manual (CLARIANT, 2014)
4. Retirada do AZ sensibilizado pela radiação UV – Utilização do removedor de AZ 100 (CLARIANT, 2014)
5. Retirada do alumínio Método de corrosão química. Solução de corrosão: $80\text{H}_3\text{PO}_4 + 10\text{H}_2\text{O} + 5\text{HNO}_3$
6. Retirada total do AZ – Utilização do removedor conforme manual, (CLARIANT, 2014)
7. Deposição de SU-8 – utilização de SU-8 2005 para obtenção de camada de 5 μm . parâmetros conforme manual (MICROCHEM, 2014).
8. Fotolitografia: Definição da cavidade parâmetros definidos no manual (MICROCHEM, 2014)
9. Corrosão do SU-8 não sensibilizados – Utilização do removedor de SU-8. Parâmetros definidos no manual (MICROCHEM, 2014).
Legenda	<div> ALUMÍNIO VIDRO </div> <div> AZ SU-8 MÁSCARA </div>

Figura 4.3 – Etapas de processo utilizadas para fabricação da estrutura da cavidade do CMUT.

A figura 4.4 mostra a estrutura das cavidades obtidas a partir de fotografia de um microscópio ótico. É possível notar, em cor mais clara, o eletrodo inferior. O contorno que está bem discreto é a limitação da cavidade. Esta foto representa a estrutura obtida na etapa 9 do processo mostrado na figura 4.3.

Figura 4.4 – Resultados da fabricação. (a) mostra a fotografia obtida a partir de um microscópio ótico da estrutura das cavidades. Cada cavidade tem $600\mu\text{m}$. (b) é o desenho em vista lateral desta etapa. Em (c) uma foto mais próxima da cavidade é mostrada.

Após a fabricação da base da estrutura, passou-se ao processo de preparação da membrana para colagem. Neste caso foram feitos três tipos distintos de colagem. O primeiro deles foi utilizando membrana com resina adesiva (cola modelo *super bonder* da fabricante LOCTITE). Neste método a cola foi depositada sobre uma fita de cobre de espessura $40\mu\text{m}$. O processo de deposição foi feito por *spin-coating* utilizou-se 2000rpm por 30 segundos. Após a deposição, a fita com o filme de cola foi alinhada à estrutura da cavidade e em seguida colado. Em seguida, aplicou-se uma leve pressão, massa uniforme com cerca de 200g e aguardou-se um tempo de 5 minutos para cura total da cola. Após o processo de cura foi medida a espessura do filme. Os resultados mostraram uma espessura média de $12\mu\text{m}$. Com isso a espessura total da membrana de cobre com resina adesiva foi próxima de $52\mu\text{m}$. Esta cola utilizada possui a propriedade de enrijecer depois de curada, com isso a membrana ficou um pouco mais rígida. Isto melhora as características de recepção e emissão do CMUT, como ficou comprovado nos resultados que serão discutidos no capítulo seguinte. As etapas de processo realizadas para a colagem

desta membrana podem ser vistas na figura 4.5. E uma foto do dispositivo fabricado é mostrada na figura 4.6.

Etapa	Vista lateral
1. Limpeza da folha de cobre. Álcool e acetona. A espessura da folha de cobre é de 40 μ m.
2. Deposição de fina camada de resina adesiva utilizando <i>spinner</i> . (12 μ m)
3. Processo de colagem. Aplicação de pressão por 5 minutos.
Legenda

Figura 4.5 – Etapas de fabricação da estrutura da membrana de cobre com deposição de resina adesiva.

Figura 4.6 – Fotografia do CMUT obtido com membrana de cobre colada com resina adesiva. Em (a) a membrana é mostrada, já em (b) o verso da membrana é mostrado.

Para os processos seguintes foi utilizada uma fita metálica da fabricante 3M modelo 1181. Esta fita é constituída por um dorso de cobre liso, com espessura de 40 μ m, recoberta com adesivo acrílico condutivo (espessura 26 μ m). No caso do processo de membrana suspensa, a cola condutiva foi retirada na região superior as estruturas das cavidades. Com isso, foi possível observar o comportamento de uma membrana não engastada, em que o ar da cavidade tem espaço para se deslocar com a vibração da membrana.

Já no outro caso a fita é totalmente colada sobre a estrutura da cavidade, mantendo a cola condutiva. Com isso, a espessura total da membrana foi de $66\mu\text{m}$. Na figura 4.7 está mostrado o roteiro de processo para obtenção do dispositivo CMUT com membrana de cobre suspensa, e a foto pode ser vista na figura 4.8. Já o roteiro para o dispositivo fabricado com membrana de cola condutiva está colocado na figura 4.9. A foto do CMUT fabricado com cola condutiva pode ser visto na figura 4.10.

Etapa	Vista lateral
1. Limpeza da folha de cobre. Álcool e acetona.	
2. Retirada da cola na região sobre a cavidade.	
3. Processo de colagem. Notem que há deflexão na membrana	
Legenda	<div> cobre alumínio SU-8 adesivo condutivo </div>

Figura 4.7 – Etapas de fabricação da estrutura da membrana de cobre com colagem fora da borda da cavidade.

Figura 4.8 – Fotografia do CMUT obtido com membrana de cobre solta. É possível ver ondulações causadas pelo não engastamento da membrana.

Etapa	Vista lateral
1. Limpeza da folha de cobre. Álcool e acetona.	
2. Processo de colagem.	
Legenda	<div> cobre alumínio SU-8 adesivo condutivo </div>

Figura 4.9 – Etapas de fabricação da estrutura da membrana de cobre com colagem total.

Figura 4.10 – Fotografia do CMUT obtido com membrana de cobre colada com cola condutiva.

A figura 4.11 mostra os parâmetros de dimensões para os três CMUTs fabricados. Nele temos t representando a espessura da membrana, g a profundidade da cavidade e d o diâmetro da cavidade. Já em 4.12 uma foto do dispositivo fabricado é mostrada e a posição dos diferentes diâmetros pode ser vista. E na tabela 4.1 os valores dos parâmetros podem ser vistos.

Figura 4.11 – Parâmetros de dimensões para os três CMUTs fabricados. Em (a) CMUT com membrana de cobre e resina adesiva. Em (b) CMUT com membrana de cobre suspensa e em (c) membrana de cobre com adesivo condutivo.

Figura 4.12 – Fotografias das amostras obtidas pelo processo descrito acima. Em (a) vemos a amostra sem a membrana, os diâmetros de cada estruturas são mostrados. A lâmina utilizada como substrato tem um comprimento de 7,6 cm. E em (b) é mostrada a amostra com membrana de cobre e também os diâmetros dos CMUTs.

Tabela 4.1 – Parâmetros de dimensões para os CMUTs fabricados.

Membrana cobre e resina adesiva			Membrana de cobre solto			Membrana de cobre colado com fita		
t(μm)	d(μm)	g(μm)	t(μm)	d(μm)	g(μm)	t(μm)	d(μm)	g(μm)
42	400	5	40	400	5	66	400	5
42	600	5	40	600	5	66	600	5
42	800	5	40	800	5	66	800	5

Após a fabricação foi verificada a continuidade elétrica dos dispositivos e também a capacitância dos CMUTs. A capacitância foi medida utilizando o medidor RLC modelo *PM 6306* da fabricante *fluke*. Com relação à continuidade elétrica não houve a verificação de curto circuito em nenhum dos CMUTs fabricados. Já os valores de capacitância encontrados podem ser vistos na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de capacitância encontrados para os CMUTs fabricados.

Membrana cobre e resina adesiva		Membrana de cobre solto		Membrana de cobre colado com fita	
d(μm)	C(pF)	d(μm)	C(pF)	d(μm)	C(pF)
400	89	400	32	400	56
600	95	600	34	600	64
800	107	800	41	800	71

Essas verificações iniciais comprovam que os dispositivos fabricados têm comportamento capacitivo. É possível notar que quanto maior o diâmetro da membrana maior foi o valor da capacitância, o que mostra coerência com a equação 2.17, mas a relação não é de proporcionalidade direta devido a alguns outros efeitos, como por exemplo, mudança no dielétrico. Na próxima seção será discutido o outro método de fabricação. Com relação à diferença entre as capacitâncias, provavelmente, a cola adesiva da fita é bem flexível quando comparada com a resina adesiva. Além disso, sua condutividade deve ser menor do que a da resina adesiva. Assim, vão se formar ondulações que tendem a aumentar a distância real entre os eletrodos, diminuindo a capacitância da membrana de cobre colado com fita. Por outro lado, era de se esperar a menor capacitância para a membrana de cobre solta, em que os eletrodos tendem a se distanciar mais facilmente. Este efeito não foi observado na membrana com cobre colado, pois a cola é condutiva.

4.1.2 Processo para CMUT com membrana de cobre, substrato de fibra de vidro metalizado com cobre e cavidade de SU-8.

Este processo de fabricação dos dispositivos CMUT foi iniciado com a obtenção do eletrodo inferior. O eletrodo foi feito a partir de um substrato de fibra de vidro recoberto com cobre. A transferência do padrão visto na figura 4.13 foi feita por usinagem a laser. No padrão temos três estruturas, sendo que cada uma delas possui 100 eletrodos e dois *pads*. Para o processo utilizou-se a prototipadora laser *ProtoLaser U3* da fabricante *LPKF Laser and Electronics* (LPKF, 2014). Esse processo é inovador, sendo que não é conhecido que o equipamento tenha sido utilizado na fabricação de dispositivos CMUT.

Figura 4.13 – Padrão dos CMUTs transferidos para substrato de cobre para formação dos eletrodos inferiores. Cada círculo é um eletrodo inferior do CMUT e possui 1 mm de diâmetro.

Cada estrutura é formada por 100 eletrodos de 1 mm de diâmetro que são divididos em dois grupos (*arrays*) de 50. Cada grupo pode ser ativado independentemente por seu respectivo *pad*. Com isso, foi possível a realização de testes independentes na mesma estrutura.

A seguir, na figura 4.14, é possível ver o substrato antes da transferência do padrão (figura 4.14(a)) e depois da transferência do padrão (figura 4.14(b)).

Figura 4.14 – Em (a) está mostrada a placa de circuito impresso sem as estruturas. Já em (b) é possível ver a mesma placa com as estruturas transferidas.

Em continuidade, foram fabricadas as cavidades dos dispositivos CMUT. Neste processo, similar ao mostrado anteriormente na seção 4.1.1, foi utilizado o fotorresiste negativo SU-8 2150. Este fotorresiste fornece uma espessura maior de cavidade, cerca de $100\mu\text{m}$. O processo consistiu das seguintes etapas: Deposição de SU-8 por *spin-coating*, fotolitografia e caracterizações para determinação das dimensões. No final as estruturas obtidas tiveram as dimensões mostradas na figura 4.15, com profundidade média de $90\mu\text{m}$, medido por perfilometria.

Figura 4.15 – Fotografias das estruturas das cavidades obtidas em um microscópio óptico após o processo de fotolitografia. Em (a) é mostrada a foto com indicação das partes da estrutura (eletrodo inferior de cobre, borda da cavidade e SU-8). A figura 5 (b) é a cavidade de 800µm a 5(c) é a cavidade de 600µm e a última figura 5 (d) mostra a cavidade de 400µm. Os pontos escuros são defeitos no SU-8.

Para o processo de colagem foram utilizados os mesmos métodos mostrados anteriormente seção 4.1.1, utilizando membrana colada com resina adesiva, membrana suspensa e membrana colada com adesivo condutivo. Os parâmetros dimensionais obtidos podem ser vistos na tabela 4.3. E os valores iniciais de capacitância podem ser mostrados na tabela 4.4. Agora, a figura 4.16 mostra um dos CMUTs fabricados por este processo.

Figura 4.16 – CMUT fabricado pelo processo descrito nesta seção, a posição dos diferentes diâmetros fabricados é mostrada. O substrato tem 7,6 cm de comprimento.

Tabela 4.3 – Parâmetros de dimensões para os CMUTs fabricados.

Membrana cobre e resina adesiva			Membrana de cobre solto			Membrana de cobre colado com fita		
t(µm)	d(µm)	g(µm)	t(µm)	d(µm)	g(µm)	t(µm)	d(µm)	g(µm)
42	400	90	40	400	90	66	400	90
42	600	90	40	600	90	66	600	90
42	800	90	40	800	90	66	800	90

Tabela 4.4 – Valores de capacitância encontrados para os CMUTs fabricados.

Membrana cobre e resina adesiva		Membrana de cobre solto		Membrana de cobre colado com fita	
d(μm)	C(pF)	d(μm)	C(pF)	d(μm)	C(pF)
400	65	400	21	400	59
600	68	600	34	600	60
800	75	800	38	800	64

Assim como no processo anterior, os CMUTs apresentaram características capacitivas. Notem também que a capacitância nesta situação foi menor do que a encontrada no outro processo. Provavelmente isto se deve à diferença entre as espessuras da cavidade, este fato também mostra coerência com a equação 2.17.

4.1.3 Processo para CMUT com membrana de cobre, substrato de fibra de vidro metalizado com cobre e cavidade de adesivo acrílico produzida com laser.

Este processo é totalmente inovador para fabricação de CMUTs e ao invés de se utilizar o SU-8 na formação da cavidade foram utilizadas colas acrílicas (LOCTITE, 2014). Adesivos similares a estes foram utilizados por outros grupos de pesquisa na fabricação de MEMS, como pode ser visto na referência (DELILLE, et al, 2006). O processo consistiu das seguintes etapas: Deposição do adesivo acrílico sobre uma placa de fibra de vidro cobreada. Este processo foi feito por *spin-coating* (30 segundos a 2000 rpm). A cura da cola foi feita por um tempo de 30 minutos. Após a cura foram abertas as estruturas da cavidade. Para o processo utilizou-se a prototipadora laser *ProtoLaser U3* da fabricante *LPKF Laser and Electronics*. Este equipamento utiliza um laser de diodo de 355nm com potência de até 6W. Neste processo foi utilizada a potencia de 1W sendo que o processo demorou cerca de 3 minutos. A sequência utilizada no processo de fabricação destas cavidades do CMUT está mostrada na figura 4.17.

Etapa	Vista lateral
1. Limpeza da placa de fibra de vidro cobreada. Álcool e acetona.
2. Deposição de resina adesiva por <i>spin-coating</i> , 2000rpm por 30 segundos. Espessura média 12μm.
3. Abertura das cavidades. Utilização Laser de diodo com 355nm e 1W.
Legenda	cobre Resina adesiva

Figura 4.17 –Etapas de fabricação da estrutura da cavidade utilizando remoção a laser.

Este processo normalmente é feito por fotolitografia. A utilização da prototipadora laser para esta aplicação é inovadora e se mostrou bastante promissora, já que o processo se torna mais rápido e não é necessário utilizar fotorresistes. A figura 4.18 mostra uma foto do equipamento e a tabela 4.5 resume suas principais características.

Figura 4.18 –Imagem da prototipadora laser modelo *protolaser U3* da fabricante *LPKF laser and electronics*. Em (a) uma visão geral da máquina é mostrada e em (b) a área de atuação do laser é mostrada. Retirado de (LPKF,2014).

Tabela 4.5 – Principais características da prototipadora *protolaser U3* da fabricante *LPKF laser and electronics*. Informações retiradas do manual da máquina que pode ser visto na referência (LPKF, 2014).

Características	Valor
Tipo de laser.	Diodo
Comprimento de onda do laser.	355nm
Mínimo diâmetro do feixe de laser.	15 μm
Potência máxima do feixe de laser.	6W
Alimentação	110/230 V, 50–60 Hz, 1,4 kW

Os resultados estão nas fotos mostradas na figura 4.19, nestas fotos é possível acompanhar as etapas do processo. O padrão transferido para as amostras pode ser visto na figura 4.20.

(a) Placa de fibra de vidro cobreada
(b) Placa de fibra de vidro após deposição de adesivo acrílico.
(c) Placa após abertura das estruturas das cavidades
(d) Placa de fibra de vidro após a retirada das amostras.

Figura 4.19 –Mostra a placa de fibra de vidro cobreada nas etapas do processo de produção das estruturas das cavidades. Na etapa (c) a amostra obtida é mostrada com suas dimensões.

Figura 4.20 – Padrão transferido para o filme de acrílico depositado sobre a placa cobreada. Foi escolhido o diâmetro de $600\mu\text{m}$.

As cavidades podem ser vistas em detalhe nas fotos mostradas na figura 4.21. Estas fotos foram obtidas através de microscopia ótica. Através destas fotos é possível notar a presença de algumas linhas internas nas cavidades. Isto se deve ao processo de retirada de material feito pela prototipadora laser. Mas, resultados que serão mostrados ainda neste capítulo e nos próximos, mostram que estas estruturas internas não prejudicaram de forma significativa o funcionamento dos dispositivos CMUTs fabricados por esta técnica.

Figura 4.21 – Fotos de microscópio ótico. Os detalhes das estruturas da cavidade obtidas são mostrados. Todas as cavidades possuem cerca de $600\mu\text{m}$ de diâmetro com uma profundidade próxima de $12\mu\text{m}$. Na imagem (d) foram colocadas setas indicando o tipo de material e o diâmetro da cavidade.

Novamente para o processo de colagem foram utilizados métodos mostrados anteriormente (seção 4.1.1). A figura 4.22 mostra os parâmetros de dimensão (t é a espessura da membrana, d o diâmetro da cavidade e g a profundidade da cavidade) e a fotografia dos dispositivos obtidos pelos três métodos de colagem de membrana. Os valores dos parâmetros dimensionais obtidos podem ser vistos na tabela 4.6. E os valores iniciais de capacitância são mostrados na tabela 4.7.

<p>(a)</p>
<p>(b)</p>
<p>(c)</p>
<p>Legenda</p>

Tabela 4.22 – Parâmetros de dimensões para os três CMUTs fabricados. Em (a) CMUT com membrana de cobre e resina adesiva. Em (b) CMUT com membrana de cobre suspensa e em (c) membrana de cobre com adesivo condutivo. As fotografias de cada uma dos dispositivos obtidos podem ser vistas ao lado.

Tabela 4.6 – Parâmetros de dimensões para os CMUTs fabricados.

Membrana cobre e resina adesiva			Membrana de cobre solto			Membrana de cobre colado com fita		
t(μm)	d(μm)	g(μm)	t(μm)	d(μm)	g(μm)	t(μm)	d(μm)	g(μm)
52	600	12	40	600	12	66	400	12

Tabela 4.7 – Valores de capacitância encontrados para os CMUTs fabricados.

Membrana cobre e resina adesiva		Membrana de cobre solto		Membrana de cobre colado com fita	
d(μm)	C(pF)	d(μm)	C(pF)	d(μm)	C(pF)
600	106	600	38	600	125

Assim como nos processos anteriores os CMUTs apresentaram características capacitivas e os resultados se mostram coerentes com a equação 2.17.

CAPITULO 5: CARACTERIZAÇÕES ELETRO-MECÂNICAS.

5.1 Capacitância do CMUT.

O CMUT é um dispositivo capacitivo, devido a isso uma análise inicial de como se comportou a capacitância dos dispositivos fabricados será feita nesta seção. Basicamente a capacitância de um capacitor de placas paralelas depende de três parâmetros: Da área do eletrodo, da distância entre os eletrodos e do material que compõe o dielétrico.

A influência da área do eletrodo será mostrada no gráfico 5.1 e é possível ver que o aumento da área, considerando espessura da cavidade e dielétrico constantes, gera um aumento na capacitância. Além deste, a influência da distância entre os eletrodos, refletida pelas diferentes espessuras de cavidade, considerando área e dielétrico constantes, também foi analisada e é mostrada no gráfico 5.2. Outros testes como o efeito da tensão de polarização DC na capacitância dos dispositivos também foram feitos.

Como descrito no processo de fabricação, foram obtidos seis diferentes tipos de CMUTs, com três dimensões diferentes de diâmetro de cavidade. Com isso o total de amostras produzidas pelo método de fotolitografia foi de dezoito.

Na tabela 5.1 um resumo com as características destas diferentes amostras é mostrado. Nesta tabela também será colocado um código para cada tipo fabricado que será utilizado no restante deste trabalho. O código segue a seguinte lógica: a primeira letra indica o tipo de substrato (A para alumínio e C para cobre), o número que vem a seguir indica qual é a espessura da cavidade (5 para $g = 5 \mu\text{m}$ e 90 para $g = 90 \mu\text{m}$), o próximo conjunto de letra indica o tipo de processo de colagem da membrana (CA é a membrana feita com cobre colado com filme acrílico não condutivo, CS representa a membrana feita com cobre solto e CF simboliza a

membrana feita com cobre colado com fita condutiva) e por fim os diâmetros das cavidades são mostrados ($d = 400 \mu\text{m}$, $d = 600 \mu\text{m}$, $d = 800 \mu\text{m}$).

Tabela 5.1 – Características das diferentes amostras e denominação de cada uma delas.

Processo	Eletrodo inferior	Espessura da cavidade	Membrana	Diâmetro	Código da amostra
1	Alumínio	SU-8 com $g = 5\mu\text{m}$	Cobre colado com acrílico não condutivo	400 μm	A5CA400
				600 μm	A5CA600
				800 μm	A5CA800
2	Alumínio	SU-8 com $g = 5\mu\text{m}$	Cobre solto	400 μm	A5CS400
				600 μm	A5CS600
				800 μm	A5CS800
3	Alumínio	SU-8 com $g = 5\mu\text{m}$	Cobre colado com fita condutiva	400 μm	A5CF400
				600 μm	A5CF600
				800 μm	A5CF800
4	Cobre	SU-8 com $g = 90\mu\text{m}$	Cobre colado com acrílico não condutivo	400 μm	C90CA400
				600 μm	C90CA600
				800 μm	C90CA800
5	Cobre	SU-8 com $g = 90\mu\text{m}$	Cobre solto	400 μm	C90CS400
				600 μm	C90CS600
				800 μm	C90CS800
6	Cobre	SU-8 com $g = 90\mu\text{m}$	Cobre colado com fita condutiva	400 μm	C90CF400
				600 μm	C90CF600
				800 μm	C90CF800

O gráfico 5.1 mostra como a capacitância varia para os diferentes diâmetros fabricados. Como previsto o valor da capacitância dos CMUTs aumentou com o aumento do diâmetro. Este resultado está de acordo com a equação 2.17. As amostras analisadas foram as A5CA600, A5CS600, A5CF600, C90CA600, C90CS600 e C90CF600.

Gráfico 5.1 – Capacitância em função do diâmetro. Em (a) são mostradas as curvas para as amostras com eletrodo inferior de alumínio. Já em (b) os resultados para os CMTUs com eletrodo de cobre podem ser vistos. As amostras analisadas foram as A5CA600, A5CS600, A5CF600, C90CA600, C90CS600 e C90CF600.

O efeito da espessura da cavidade sobre a capacitância também foi analisado e pode ser visto no gráfico 5.2. É possível ver que as amostras feitas com espessura de cavidade maiores (90μm) apresentaram valores de capacitância menores. Este resultado também está de acordo com a equação 2.17.

Gráfico 5.2 – Capacitância em função da espessura da cavidade para amostras com diferentes diâmetros de cavidade. A curva em preto refere-se as amostras A5CA400, A5CA600 e A5CA800, já a curva vermelha foi obtida com as amostras C90CA400, C90CA600 e C90CA800. Notem que as amostras com espessura de cavidade menor possuem uma capacitância maior.

5.1.1 Polarização do CMUT

Para que o CMUT funcione é necessário aplicar uma tensão de polarização DC em seus eletrodos. Como descrito no capítulo referente às simulações, esta tensão tem duas funções básicas. A primeira é eletrizar os eletrodos do CMUT e a segunda é fazer com que haja uma aproximação entre os eletrodos causando assim um tensionamento na membrana. Para polarizar o CMUT foi utilizado o circuito elétrico mostrado na figura 5.1. Nele temos uma fonte de tensão DC variável de 0 a 100V indicada por VDC. Além desta, um conjunto R-C é utilizado. Este circuito é conhecido como *bias-tee* e permite que instrumentos possam ser ligados entre a referência do circuito (terra) e o capacitor sem que sejam afetados pela tensão de polarização. Os valores de referência dos componentes utilizados no circuito de polarização podem ser vistos na tabela 5.2.

Figura 5.1 – Circuito *bias-tee* utilizado para polarização do CMUT.

Tabela 5.2 –Valores de referência dos componentes utilizados no circuito de polarização. O resistor utilizado foi de 0,25 de watt e o capacitor é cerâmico.

Componente	Referência	Valor
Resistor	R	2,2M Ω
Capacitor	C	200nF
Fonte de tensão	VDC	0 a 124Vdc

Utilizando o circuito *bias-tee* e o medidor RLC modelo *PM 6306* da fabricante *fluke* foi possível observar o efeito da polarização na capacitância dos CMUTs fabricados. Pode-se notar que os valores das capacitâncias dos CMUTs analisados

têm tendência de aumento conforme a tensão de polarização é aumentada. Estes resultados são mostrados nos gráficos que podem ser vistos no gráfico 5.3. Todos os resultados foram obtidos para os CMUTs com os três tipos de membrana fabricados e com eletrodos de alumínio e cobre. Os diâmetros de 400 μ m, 600 μ m e 800 μ m foram analisados.

Gráfico 5.3 – Capacitância em função da tensão de polarização. De (a) a (c) os resultados para substrato de vidro e eletrodo inferior de alumínio são mostrados (todas as nove amostras produzidas foram analisadas). E de (d) a (f) são mostrados os resultados para substrato de fenolite com eletrodo inferior de cobre (todas as nove amostras produzidas foram analisadas). Em todos os gráficos é possível ver uma tendência de subida da capacitância conforme a tensão de polarização VDC é aumentada.

A partir destes resultados é possível afirmar que há uma dependência entre a tensão de polarização e a capacitância dos CMUTs. Como a capacitância aumenta com o aumento da tensão é bem provável que a membrana tenha defletido no sentido do fundo da cavidade, causando uma diminuição da altura da cavidade. Nas simulações computacionais foi possível observar também este efeito (gráficos 3.4, 3.6 e 3.7).

Através desta mesma análise foi possível verificar que nenhum dos CMUTs fabricados atingiu a tensão de colapso, mesmo quando uma tensão de polarização VDC de 100V. Este resultado vai de encontro ao observado nas simulações, onde para tensões de polarização de 100V nenhuma amostra apresentou colapso.

5.2 CMUT como emissor

Foram feitos testes para mostrar que os CMUTs fabricados também funcionam no modo emissor.

No modo emissor o CMUT é submetido à tensão de polarização VDC e também a uma tensão de excitação VAC, criando assim um acoplamento AC-DC. A tensão DC causa uma aproximação dos eletrodos e a tensão AC causa a vibração na membrana que possui uma frequência equivalente ao valor da frequência da tensão AC aplicada. A figura 5.2 mostra o circuito utilizado nas medições. As medições foram feitas nos CMUTs de 600 μ m (A5CS600, A5CA600, C90CS600 e C90CA600), utilizou-se uma tensão de polarização VDC = 100V. Já a tensão VAC foi obtida por um gerador de funções modelo 3312A da fabricante *Agilent* sendo a amplitude da onda de 10V e a faixa de frequência medida foi de 0 a 30kHz.

Figura 5.2 – Circuito de acoplamento AC-DC utilizado para verificação do funcionamento dos CMUTs no modo emissor.

Para a captação do sinal emitido pelos CMUTs foi utilizado um microfone da fabricante *Apple* com resposta em frequência de 5 a 30kHz e impedância de saída de 23Ω . O arranjo utilizado pode ser visto na foto mostrada na figura 5.3. Uma imagem do software *RODE rec* (RODE, 2014) utilizado para a aquisição dos dados pode ser vista na figura 5.4. Já os resultados podem ser vistos no gráfico 5.4.

Figura 5.3 – Arranjo utilizado nas medições do CMUT como emissor. É possível ver o CMUT e o microfone utilizado como receptor.

Figura 5.3 – Imagem do software *RODE rec*, utilizado nas análises de recepção do CMUT. Retirado de (RODE, 2014).

Gráfico 5.4 – Curvas de resposta a emissão. As curvas (a) e (b) são resultados das amostras feitas com eletrodo de alumínio. E as curvas (c) e (d) são os CMUTs feitos em substrato com eletrodo de cobre.

Fica bem evidente que as amostras feitas com cobre colado com resina adesiva apresentam maior intensidade de emissão em praticamente toda faixa medida. A resina adesiva, após a cura, torna a membrana mais rígida o que se reflete em um menor amortecimento. Este fato pode causar esse aumento de intensidade observado. Para todas as amostras analisadas ocorreu uma faixa de emissão intensa entre 18kHz e 25kHz.

5.3 CMUT como receptor

Na aplicação proposta, o CMUT deve trabalhar no modo receptor. Assim, por exemplo, ele poderá captar os sinais de vibração advindos das máquinas industriais. No modo emissor o CMUT também deve estar polarizado pela tensão VDC. Para caracterizar os dispositivos, foi utilizada uma fonte emissora de ondas acústicas piezelétrica montada em fone intra-auricular da fabricante *Apple* (APPLE, 2014) com as seguintes características: resposta em frequência de 1Hz a 21kHz, impedância de 32Ω e potência de 50mW. O arranjo utilizado nas medições pode ser visto na figura 5.5. Este fone foi escolhido devido a sua boa estabilidade na faixa de frequência analisada (0 a 2500Hz). (o gráfico de resposta em frequência do fone utilizado pode ser visto na figura 5.6, retirado de (APPLE, 2014)).

Figura 5.5 – Arranjo utilizado nas medições do CMUT como receptor. É possível ver o emissor e o CMUT.

Figura 5.6 – Gráfico de resposta em frequência do emissor utilizado nas medições de recepção do CMUT. É possível ver que na faixa de 0 a 2500Hz há uma boa linearidade. SPL é a sigla em inglês para nível de pressão sonora (retirado de (APPLE, 2014))

Quando a onda acústica atinge o CMUT, há uma modulação da capacitância, que se reflete numa mudança do fluxo de corrente no circuito. Para captar o sinal elétrico em corrente enviado pelo CMUT utilizou-se um circuito com o amplificador operacional modelo OPA2604 da fabricante *Texas Instruments* (TI, 2014), mostrado na figura 5.7. A corrente modulada pelo CMUT tem características alternada, com isso ela passa por C1 em direção ao amplificador operacional que está montado na configuração de transimpedância (NASCIMENTO; et al, 1999). O amplificador irá amplificar a corrente recebida e a converter em sinal de tensão elétrica. Na saída foi ligado um circuito de aquisição de sinais, que captou os valores de tensão e os enviou para um microcomputador. Este circuito de aquisição é composto por um microcontrolador Atmega328 montado em uma plataforma do tipo Arduino (ARDUÍNO, 2014). A figura 5.8 mostra o circuito de aquisição do sinal. Na tabela 5.3, os valores de referência dos componentes são mostrados.

Figura 5.7 – Circuito utilizado na captação dos sinais de recepção do CMUT. Nele o CMUT está polarizado com um $VDC = 100V$. Quando o sinal acústico atinge o CMUT há uma modulação na corrente. Esta corrente passa por $C1$ e é amplificada pelo circuito com o OPA2604. Na saída é captada por um circuito microcontrolado, que por sua vez envia o sinal a um microcomputador.

Figura 5.8 – Plataforma de desenvolvimento Arduino utilizada como circuito de aquisição dos resultados de recepção. Esta plataforma utiliza um microcontrolador Atmega328.

Tabela 5.3 – Valores de referência dos componentes utilizados no circuito de captação de sinal de recepção.

Componente	Referência	Valor
Resistor	R1	2,2M Ω
Resistor	R2	2,2M Ω
Capacitor	C1	200nF
Capacitor	C2	100pF
Fonte de tensão	VDC	100V
Amplificador	U2:A	OPA 2604A

Para estas medições foram utilizados CMUTs com diâmetros de 600 μm para todos os tipos fabricados os códigos são A5CA600, A5CS600, A5CF600, C90CA600,

C90CS600 e C90CF600. A faixa de frequência enviada ao emissor foi de 1Hz a 2200Hz e a ideia desta análise de recepção é verificar em quais frequências o CMUT é mais sensível. Para todas as medidas, a distância entre o emissor e o CMUT foi de 5 μ m. O sinal foi gerado pelo software *function generator* da fabricante *syclabs* (SYCLABS, 2014). Este software gera uma variação da frequência em função do tempo na faixa desejada. Para as análises que foram feitas neste trabalho foi utilizada a variação mostrada no gráfico 5.5. Já uma imagem do software *function generator* está mostrada na figura 5.9. E, por fim no gráfico 5.5, os resultados são mostrados.

Gráfico 5.5 – Curva de *sweep* gerada no software *function generator*. Em 60 segundos uma variação 1 a 2500Hz foi obtida.

Figura 5.9 – Imagem do software *function generator*, utilizado nas análises de recepção do CMUT. Retirado de (SYCLABS, 2014).

Gráfico 5.6 – Curvas de resposta à recepção. De (a) a (c) são as amostras feitas com eletrodo de alumínio. De (d) a (e) são os CMUTs feitos em substrato com eletrodo de cobre.

Os dispositivos fabricados com membranas de cobre colado com fita condutiva, códigos A5CF600 e C90CF600 (gráficos 5.6 (c) e (f)) não apresentaram boa resposta as ondas acústicas emitidas pelo piezo. Isto se deve, ao fato de a cola que compõe a fita modelo 1181 da 3M ser muito flexível e ter uma espessura elevada (próxima de $26\mu\text{m}$). Esta combinação gerou uma dificuldade para que a membrana de cobre pudesse vibrar livremente, os resultados das outras amostras indicam isso também.

As amostras fabricadas com membrana de cobre solta, códigos A5CS600 e C90CS600 (gráficos 5.6 (b) e (e)) apresentaram resultados melhores, possuindo intensidade de recepção maior e ainda picos de recepção relativamente definidos. A amostra do gráfico 5.6 (b) apresenta boa recepção entre 500Hz e 700Hz, com um pico de recepção em torno de 600Hz. Já a amostra do gráfico 5.6(e) apresenta boa recepção entre 750Hz e 1250Hz, possuindo um pico bem intenso e estreito em 1070Hz. Estas diferenças se devem as espessuras diferentes dos dispositivos. Os bons resultados observados nas amostras mostradas nos gráficos 5.6 (b) e (e) se devem, justamente, ao fato destas membranas estarem soltas. Este fato gera uma facilidade para que o ar não fique confinado dentro da cavidade, isto facilita a vibração da membrana. Além disso, estas membranas não possuem a cola flexível presente nas amostras dos gráficos 5.6 (c) e (f). Este resultado indica que amostras produzidas em vácuo podem apresentar bons resultados.

Já as amostras com membrana coladas com resina adesiva, códigos A5CA600 e C90CA600 (gráficos 5.6 (a) e (d)) também apresentaram bons resultados. Mostraram picos de intensidade de emissão definidos (cerca de 300Hz nos dois casos), porém a frequência dos picos de emissão foram mais baixas nos dois casos se comparadas com as amostras com membrana solta, talvez este fato seja devido ao amortecimento provocado pelo ar no interior das cavidades, que não tem por onde escapar.

A partir destes resultados é possível dizer que tanto as amostras A5CA600 e C90CA600 como as amostras A5CS600 e C90CS600 apresentaram resultados que podem permitir a aplicação em análise de vibração.

Considerando os resultados obtidos foram feitos outros testes para verificar o efeito de alguns parâmetros na resposta à recepção do CMUT. O Primeiro deles foi a verificação do efeito da tensão de polarização sobre a intensidade de recepção. Em

seguida, foi verificado como a distância entre a fonte emissora e o CMUT pode afetar a recepção. E por fim a relação entre a intensidade da fonte emissora e a intensidade de recepção também foi verificada. Todos estes três testes foram feitos para amostra de código C90CA600.

5.3.1 Efeito da tensão de polarização sobre a recepção.

Para verificar o efeito da tensão de polarização VDC no modo recepção foi levantada a curva da intensidade em função de VDC. Este gráfico foi obtido para amostra com substrato de cobre e membrana colada com resina adesiva não condutiva para o CMUT com $600\mu\text{m}$, código C90CA600 (gráfico 5.7) a fonte emissora foi colocada a 5mm e a frequência de emissão era de 300Hz, próximo ao pico de intensidade encontrado na amostra analisada.

É possível notar que o aumento da tensão de polarização gera um aumento na intensidade. Isso mostra que o valor da tensão de polarização influencia no funcionamento do CMUT.

Gráfico 5.7 – Curva de intensidade de emissão em função da tensão de polarização VDC. É possível notar a influencia de VDC na intensidade.

5.3.2 Efeito da distância do emissor sobre a recepção.

Outra verificação feita nesta mesma amostra foi do efeito da distância da fonte emissora (piezo) do CMUT o gráfico 5.8 mostra o resultado. Nota-se que quanto maior a distância menor a intensidade. Este efeito se deve à atenuação do sinal acústico do emissor, como visto na equação 2.6 o campo de pressão acústico decai com a distância. A amostra analisada foi a mesma do teste anterior (código C90CA600) a tensão de polarização aplicada no CMUT foi de 100V.

Gráfico 5.8 – Gráfico da influência da distância da fonte emissora (piezo) do CMUT. É possível ver que a intensidade cai conforme a distância da fonte aumenta.

5.3.3 Efeito da intensidade do emissor sobre a recepção.

Outro teste realizado foi a influência da intensidade da fonte emissora na intensidade de recepção do CMUT. Para esta análise também foi utilizado o CMUT de código C90CA600. Os resultados podem ser vistos no gráfico 5.9.

Gráfico 5.9 – Intensidade de recepção do CMUT em função da intensidade de emissão. Quanto maior a intensidade da fonte emissora mais o CMUT consegue captar o sinal.

Nota-se que quanto menor a intensidade da fonte emissora, menor é a intensidade de recepção. Este resultado é coerente, pois uma menor intensidade da fonte emissora se reflete em uma onda acústica menos intensa o que dificulta a recepção pelo CMUT.

5.4 CMUT fabricado com resina adesiva removida a laser

O processo de fabricação do CMUT utilizando a prototipadora laser para remover o material da cavidade é totalmente inovador e abre novas perspectivas para a fabricação deste dispositivo. As principais vantagens deste processo são a rapidez e praticidade da produção das estruturas da cavidade, como foi detalhado no capítulo anterior na seção 4.1.3.

Nesta seção serão mostrados os principais resultados obtidos para o CMUT produzidos por este método. Características de variação da capacitância, influência da tensão de polarização, comportamento como emissor e como receptor foram analisadas e serão mostradas nas próximas seções.

Os CMUTs analisados possuem $600\mu\text{m}$ de diâmetro de cavidade. As cavidades estão montadas em uma matriz de 20×20 , totalizando 400 cavidades por dispositivo, ocupando uma área total de 4cm^2 . As profundidades destas cavidades estão em torno de $12\mu\text{m}$. Estes detalhes podem ser vistos na fotografia mostrada na

figura 5.10. Os CMUTs fabricados com as três diferentes membranas foram testados.

Figura 5.10 – Matriz de cavidades produzidas pelo método de corrosão a laser. No total são 400 cavidades de 600µm de diâmetro cada.

As amostras fabricadas por este método também receberam códigos de identificação, o que facilitará a apresentação dos resultados. A tabela 5.4 mostra estes códigos que foram baseados nas características dos CMUTs fabricados. Estas características também estão mostradas na mesma tabela 5.4. Os códigos seguem a seguinte metodologia. As duas primeiras letras indicam o tipo de membrana (CA - Cobre colado com resina adesiva; AC- Cobre colado com adesivo condutivo e CS - Cobre solto) o valor numérico 600 indica que estes dispositivos foram construídos com uma cavidade de diâmetro igual a 600µm.

Tabela 5.4 – Características das diferentes amostras e denominação de cada uma delas.

Processo	Eletrodo inferior	Membrana	Diâmetro e espesura	Código da amostra
1	Cobre	Cobre colado com resina adesiva	d = 600 µm e g = 12µm	CA600
2	Cobre	Cobre colado com adesivo condutivo	d = 600 µm e g = 12µm	AC600
3	Cobre	Cobre solto	d = 600 µm e g = 12µm	CS600

5.4.1 influência da tensão de polarização na capacitância.

Assim como nas amostras obtidas pelos outros métodos, foi possível verificar a influência da tensão de polarização DC sobre a capacitância do dispositivo fabricado. Para isto, foi utilizado o circuito de polarização mostrada na figura 5.1. Novamente utilizou-se para as medições o equipamento modelo *PM 6306* da fabricante *fluke*.

Foram realizadas medições de 0 a 120V com um passo de 20V. Os resultados podem ser vistos nos gráficos 5.10, 5.11 e 5.12. As amostras analisadas foram as: CA600, AC600 e CS600.

Gráfico 5.10 – Variação da capacitância da amostra CA600 com a tensão de polarização. É possível notar que para cada incremento de tensão a capacitância aumenta. Houve uma variação de 12pF se for considerada a variação de tensão de 0 a 120V.

Gráfico 5.11 – Variação da capacitância da amostra AC600 com a tensão de polarização. É possível ver o aumento da capacitância com a tensão. A amplitude da variação foi de 4pF.

Gráfico 5.12 – Variação da capacitância da amostra CS600 com a tensão de polarização. É possível ver o aumento da capacitância com a tensão. A amplitude da variação foi de cerca 18 pF.

Para todas as amostras analisadas foi possível verificar que a capacitância dos dispositivos aumentou com a tensão de polarização. Isto se deve ao fato da tensão causar uma aproximação entre o eletrodo inferior (fundo da cavidade) e o eletrodo superior (membrana). A amostra CS600 apresentou a maior amplitude de variação de capacitância, provavelmente isto se deve ao fato desta membrana solta não apresentar tanta resistência à força eletrostática. Já a amostra com membrana colada com resina adesiva, apresentou uma amplitude de variação de próxima de 12pF, mas o valor da capacitância era inicialmente maior, provavelmente o processo de colagem já deixou a membrana mais próxima do eletrodo inferior. Por fim a amostra AC600, com adesivo condutivo apresentou a maior capacitância inicial, mas sua amplitude de variação foi baixa, cerca de 4pF. É provável que o adesivo condutivo dificulte a aproximação entre o eletrodo inferior e a membrana, talvez devido sua baixa rigidez.

5.4.2 CMUT como emissor.

Os CMUTs fabricados pelo método de corrosão a laser também tiveram seu funcionamento testado no modo emissão. Neste modo uma tensão VDC acoplada

com uma tensão VAC é aplicada ao CMUT. Como resposta tem-se uma vibração da membrana que gera uma perturbação no ar, causando o efeito de emissão de ondas acústicas. O arranjo utilizado nestes testes é similar ao visto na seção 5.2. E o circuito usado foi o mesmo mostrado na figura 5.2. As amostras CA600 e CS600 foram analisadas e os resultados podem ser vistos no gráfico 5.13.

Gráfico 5.13 – Curvas de resposta à emissão para as amostras CA600 e CS600.

Assim como verificado anteriormente as amostras feitas com cobre colado com resina adesiva apresentaram maior intensidade de emissão em praticamente toda faixa medida. Também é possível observar uma maior intensidade na faixa entre 18kHz e 25kHz.

5.4.3 CMUT como receptor.

Como a aplicação proposta neste trabalho visa à análise de vibrações, o modo de recepção do CMUT fabricado deve ser analisado com mais detalhes. Isto foi feito tanto para as amostras obtidas pelo método de fotolitografia como para as amostras obtidas por corrosão a laser.

Para avaliar a recepção foram utilizados os CMUTs de códigos CA600, CS600 e AC600. Nesta avaliação foi utilizada a mesma metodologia vista na seção 5.3.

Também os mesmos equipamentos e instrumentos utilizados na caracterização anterior foram utilizados.

A primeira análise foi obter a resposta à recepção dos CMUTs fabricados. O emissor novamente foi o auto falante intra-auricular da fabricante *Apple*. Esta fonte foi mantida a uma distância fixa de 5mm do CMUT, que estava polarizado com um VDC=100V. Foi gerada uma variação de frequência de 0 a 4,5MHz (novamente utilizou-se o software *function generator* da fabricante *syclabs*) e a resposta foi captada pela mesma montagem vista na figura 5.7.

Os resultados podem ser vistos no gráfico 5.14 para a amostra CS600, no gráfico 5.15 para a amostra CA600 e por fim no gráfico 5.16 para a amostra AC600.

Gráfico 5.14 – Curvas de resposta à recepção para a amostra CS600. É possível ver uma faixa de recepção mais intensa entre 500 e 1500Hz. Sendo que o pico está em torno de 1070Hz.

Gráfico 5.15 – Curvas de resposta a recepção para a amostra CA600. Diferentemente da amostra CS600 não existe uma faixa bem definida de frequência. Mas é possível ver um pico em cerca de 500Hz e outro, bem intenso em 1470Hz.

Gráfico 5.16 – Curvas de resposta à recepção para a amostra AC600. Diferentemente das amostras CS600 e CA600 não existe uma região de recepção bem definida.

Novamente é possível ver que o fato da cola que compõe a fita modelo 1181 da 3M ser muito flexível e ter uma espessura elevada (cerca de $26\mu\text{m}$) causou uma má definição e baixa intensidade de recepção do sinal. Isto pode ser visto no gráfico 5.16. Este gráfico mostra o resultado da recepção para a amostra AC600, feita com membrana de resina adesiva condutiva.

Assim como observado nas amostras fabricadas pelo método de fotolitografia, o CMUT fabricado com membrana solta (amostra CS600, gráfico 5.14) também apresentou uma faixa de recepção bem definida. Já a amostra CA600, apresentou uma banda mais larga de resposta a emissão (gráfico 5.15). Estes resultados apontam que as amostras CA600 e CS600 podem ser utilizadas na aplicação proposta.

5.4.4 Efeito da tensão de polarização sobre a recepção.

Para verificar o efeito da tensão de polarização VDC no modo recepção para as amostras feitas com processo de construção da cavidade a laser foi levantada a curva da intensidade em função de VDC. Esta curva foi obtida mantendo o emissor a 1280Hz para a amostra CS600 e em 1470Hz para a amostra CA600. Estes níveis de frequência foram escolhidos, pois são os mais próximos dos picos de intensidade

máxima de recepção. Para a amostra AC600, não foi levantada esta curva, já que não houve um pico de recepção definido.

As medições foram feitas com uma variação de tensão de 0 a 100V. Os arranjos utilizados nestas análises são similares aos vistos na figura 5.5. O circuito de aquisição com *Atmega 328* foi novamente utilizado, bem como o circuito amplificador de transimpedância com o amplificador operacional OPA2604 (figura 5.7). A distância entre a fonte emissora e o CMUT foi de 5mm para os dois casos. Os gráficos 5.17 e 5.18 mostram os resultados.

Gráfico 5.17 – Intensidade do pico de recepção em 1280Hz para a amostra CS600 em função da tensão de polarização VDC. Quanto maior a tensão de polarização VDC, maior é a intensidade do sinal de recepção.

Gráfico 5.18 – Intensidade do pico de recepção em 1470Hz para a amostra CA600 em função da tensão de polarização VDC. Quanto maior a tensão de polarização VDC, maior é a intensidade do sinal de recepção.

Os dois resultados mostram que a aplicação da tensão de polarização gera um efeito de aumento da intensidade de recepção. Estes resultados são similares

aos encontrados nas amostras feitas por outros processos (gráfico 5.5). Estes resultados também sugerem que para estas amostras uma tensão de polarização de apenas 20V já gera um aumento de mais de 50% na intensidade. Ou seja, estas amostras já podem ser aplicadas com tensões de polarização com cerca de apenas 20V.

5.4.5 Efeito da distância do emissor sobre a recepção.

Também nestas amostras foram feitas verificações do efeito da distância da fonte emissora (piezo) do CMUT. Para estes testes, foi utilizada uma tensão de polarização de 100V e as análises foram feitas nos picos de frequência de recepção.

A variação da distância analisada foi de 1mm a 10mm. Os gráficos 5.19 e 5.20 mostram os resultados. Nota-se que quanto maior a distância menor a intensidade. Este efeito se deve a atenuação do sinal acústico do emissor, como visto na equação 2.6 o campo de pressão acústico decai com a distância. As amostras analisadas foram CA600 e a CS600.

Gráfico 5.19 – Gráfico da influência da distância da fonte emissora (piezo) do CMUT, amostra CA600. É possível ver que a intensidade cai conforme a distância da fonte aumenta.

Gráfico 5.20 – Gráfico da influência da distância da fonte emissora (piezo) do CMUT, amostra CS600. É possível ver que a intensidade cai conforme a distância da fonte aumenta.

Nota-se que em ambas as amostras houve decaimento da intensidade de recepção conforme a distância do emissor é aumentada.

5.4.6 Efeito da intensidade do emissor sobre a recepção.

Outro estudo realizado também nestas amostras fabricadas com processo de corrosão da cavidade a laser foi a influência da intensidade da fonte emissora na resposta a recepção do CMUT. Novamente foi possível verificar que quanto menor a intensidade da fonte emissora menor a intensidade de recepção do CMUT. Novamente os picos de frequência de 1280Hz e 1470Hz foram utilizados, para as amostras CS600 e CA600, que estavam polarizadas com 100V. Os gráficos 5.21 e 5.22 mostram os resultados.

Gráfico 5.21 – Intensidade de recepção do CMUT em função da intensidade de emissão, para a amostra CS600. Quanto maior a intensidade da fonte emissora mais o CMUT consegue captar o sinal.

Gráfico 5.22 – Intensidade de recepção do CMUT em função da intensidade de emissão, para a amostra CA600. Quanto maior a intensidade da fonte emissora mais o CMUT consegue captar o sinal.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados dispositivos CMUTs fabricados através de métodos e materiais alternativos com potencial aplicação em ensaios não destrutivos. Inicialmente foram feitas as modelagens analítica e computacional. Ambas atenderam os objetivos de determinar as dimensões dos dispositivos a serem fabricados e também o tipo de material de membrana, no caso o cobre.

A partir da definição das dimensões e do material de membrana foram propostos roteiros de fabricação baseados na técnica de *bonding*. Os roteiros de fabricação propostos, tanto pelo método de fabricação por corrosão de camada sacrificial como por remoção a laser se mostraram adequados, já que os CMUTs obtidos apresentaram propriedades eletro-mecânicas adequadas. Vale frisar que o método utilizando corrosão a laser e resina adesiva, como material estrutural da cavidade, é totalmente inovador.

Todos os CMUTs fabricados apresentaram propriedades capacitivas, sendo que a variação da capacitância destes dispositivos mostra uma dependência com o diâmetro, com a altura da cavidade e com o material que compõe o dielétrico.

Como emissor e receptor os CMUTs fabricados com membranas coladas com adesivo condutivo não apresentaram bons resultados, não mostrando picos característicos. As mesmas medidas mostraram que os CMUTs com membranas de cobre coladas com resina adesiva podem ser aplicados nas faixas de frequência desejadas para a potencial aplicação, o uso desta resina como adesivo para a membrana e como material estrutural da cavidade é inovador e em conjunto com o método de corrosão a laser permite que dispositivos MEMS sejam fabricados fora de ambiente de sala limpa. Já CMUTs fabricados com membrana de cobre solto podem eventualmente trabalhar nos modos emissão e recepção. Porém mais análises deverão ser feitas para testar repetibilidade.

Nas amostras estudadas ficou claro que a intensidade de recepção depende da tensão de polarização, da intensidade da fonte emissora e da distância entre esta fonte e o CMUT.

Como as faixas de frequência obtidas na recepção e emissão estão próximas à faixa utilizada em ensaios não destrutivos fica sugerido que os dispositivos fabricados podem ser potencialmente aplicados nestes ensaios.

TRABALHOS PUBLICADOS.

COBEM 2011 (ABCM Symposium Series in Mechatronics)

OLIVEIRA, V. I. ; IBRAHIM, R. C. ; TORIKAI, D. ; Lima, B. L. S. ; MENDONÇA, Lucas Gonçalves Dias ; PIAZZETA, M. H. O. ; GOBBI, A. L. . ***Modeling, simulation and fabrication of a MEMS-based electrostatic capacitive effect-CMUT: For generation and reception of acoustic waves.*** In: COBEM 2011- 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011, Natal-RN. Proceedings of the 21st International Congress of Mechanical Engineering, 2011.

SBMICRO 2012 (Repercussão Internacional)

OLIVEIRA, V. I. ; IBRAHIM, R. C. ; E. A. BARROS; TORIKAI, D. ; Lima, B. L. S. ; MENDONÇA, DIAS, L. G.; PIAZZETA, M. H. O. ; GOBBI, A. L. ***MEMS-Based Ultrasound Transducer: CMUT Modeling and Fabrication Process.*** no ECS Transactions, p.431-438, v. 49, n. 1, DOI: 10.1149/04901.0431ecst, 2012 (2)

INOVAÇÕES

- Modelagem comparativa de diferentes tipos de membranas (inclusive materiais não convencionais).
- Definição de dois métodos de fabricação para fabricação de CMUT com membrana de cobre.
 1. Utilizando corrosão da camada sacrificial
 2. Utilizando remoção a laser.
- Utilização de resina adesiva tanto como material estrutural da cavidade como para colar a membrana.
- Verificação do modo recepção e emissão em frequências relativamente baixas.

PERSPECTIVAS

Com os resultados obtidos até aqui ficam ainda algumas sugestões para trabalhos futuros que podem complementar esta tese:

- Criar uma metodologia para aplicar os dispositivos fabricados em ensaios não destrutivos.
- Estudar sistematicamente amostras fabricadas com cavidade de resina adesiva produzidas com corrosão a laser.
- Estudar a resposta à emissão e a recepção dos CMUTs fabricados em frequências mais altas.
- Criar um sistema para fazer a colagem da membrana do CMUT em vácuo.
- Utilizar novas técnicas de caracterização, como por exemplo, holografia a laser. Que pode ser feito no laboratório de ótica da FATEC-SP.
- Melhorar circuitos de aquisição de sinais, tanto de emissão como de recepção.

REFERÊNCIAS

ABENDI, retirado de: <http://www.abendi.org.br/abendi/> , acesso em 16/08/2014

ALLEN, J. J., **Micro Electro Mechanical System Design**. Taylor & Francis Group, USA, 2005.

ANSYS, **ANSYS 10.0 Manual**, Ansys Inc., Canonsburg, PA.

APPLE, retirado de: <https://www.apple.com/br/ipod/in-ear-headphones/>, acesso em 16/08/2014.

ARDUÍNO, retirado de: <http://www.arduino.cc/>, acesso em 16/08/2014.

AULD, B. A., **Acoustic Fields and Waves in Solids**, Krieger Publishing Company, 1990.

BAYRAM, B., et al, **Dynamic analysis of cmuts in different regimes of operation**, IEEE Ultrasonics Symposium 2003, pp. 481- 484, 2003.

BEEBY, S., et al, **MEMS Mechanical Sensors**, Artech House, USA, 2004.

BLAUERT, J., e XIANG, N., **Acoustics for Engineers**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2008.

BOYLESTEAD, R. L., **Introdução a Análise de Circuitos**, 10° ed., Prentice Hall do Brasil, Brasil, 2004.

BOZKURT, A., et al, **Analytic modeling of loss and cross coupling in capacitive micromachined ultrasonic transducers**, IEEE Ultrasonics Symposium 1998, pp. 1025-1028, 1998.

BOZKURT, A., LADABAUM, I., ATALAR, A., e KHURI-YAKUB, B.T., **Theory and analysis of electrode size optimization for capacitive microfabricated ultrasonic transducers**, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.* , vol.46, pp.1364-1374, 1999.

CAMPBELL, S. A., **The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication**, Oxford University Press, New York, 1996.

CHAPMAN, B., **Glow Discharge Processes, Sputtering and Plasma Etching**, John Wiley & Sons, USA, 1980.

CLARIANT, **Product Data Sheet – AZ 4500 Series**, retirado de: <http://www.clariant.com/corp/internet.nsf/directname/downloads>, acesso em 22/01/2012.

CRETU, W. Y., ROHLING, R. E., **Analytical Modeling of CMUTs in Coupled Electro-Mechano-Acoustic Domains Using Plate Vibration Theory**, *Sensors Journal*, pp. 2159 – 2168, 2011.

CURIE, P., e CURIE, J., **Développement par compression de l'électricité polaire dans lès cristauxhémiédres à faces inclinées**, Bulletin 4 de la Société Minéralogique de France, 1880.

DELILLE, M., et al, **Benchtop Polymer MEMS**, *journal of microelectromechanical systems*, vol. 15, no. 5, 2006.

DENTINGER P. M., CLIFT W. M., GOODS S. H., **Removal of SU-8 photoresist for thick film applications**, *Microelectronic Engineering*, pp. 993-1000, 2002.

ERGUN, A.S., HUANG, Y., ZHUANG, X., ORALKAN, O., YARAHOGU, G.G., AND KHURI-YAKUB, B.T., **Capacitive micromachined ultrasonic transducers: fabrication technology**, *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 52, no. 12, pp. 2242- 2258, 2005.

ERGUN, A.S., YARALIOGLU, G.G., AND KHURI-YAKUB, B.T., **Capacitive micromachined ultrasonic transducers : Theory and technology**, *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 76 - 84, 2003.

FIALKO, S.YU., KRIKSUNOV, E.Z., e KARPILOVSKY, V.S., **A block Lanczos method with spectral transformations for natural vibrations and seismic analysis of large structures in SCAD software**, *Computer Methods in Mechanics*, pp.1-9, 2003.

GAD-EL-HAK, M., **The MEMS Handbook**, CRC PRESS, USA, 2001.

GARDONIO, P., FAHY, F., **Sound and Structural Vibration**, Elsevier, Oxford, 2^oed, 2007.

GOODMAN, J. W., **Introduction to Fourier Optics**, McGraw-Hill, New York, 1968.

GOSELE U., TONG Q. Y., **Semiconductor Wafer Bonding**, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, vol. 28, pp. 215-241, 1998.

HALLER, M. I., e KHURI-YAKUB, B. T., **A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer**, *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, pp. 1241-1244. 1994.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., **Fundamentos de Física II**. 5ed.,Livros Técnicos e Científicos, Brasil, 2003.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., **Fundamentos de Física III**. 5ed.,Livros Técnicos e Científicos, Brasil, 2003.

HARRIS, T. A., **Rolling Bearing Analysis**. John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1966.

HOPCROFT M. et al., **Micromechanical testing of SU-8 cantilevers**, *ATEM'03, JSME-MMD*, pp.1-4, 2003.

HUANG, Y., et al. **Fabricating Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers with Wafer-Bonding**, IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 12, no.2, pp. 128-137, 2003.

HUANG, Y.L., et al., **Comparison of conventional and collapsed region operation of capacitive micromachined ultrasonic transducers**, **Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, IEEE Transactions on, vol. 53, no. 10, pp. 1918- 1932, 2006.

HUTTON, D.V., **Fundamentals Finite Elements Analysis**, McGraw-Hill Companies, USA, 2004.

ISO 10816-3, **mechanical vibration**, 1998.

JIN, X., LADABAUM, I., e KHURI-YAKUB, B.T., **The Microfabrication of Capacitive Ultrasonic Transducers**, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 7, pp. 295-302, 1998.

JIN, X., et al., **Characterization of One-Dimensional Capacitive Micromachined Ultrasonic Immersion Transducer Arrays**, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.*, vol. 48, pp. 750-760, 2001.

KAWAI, H., **Piezoelectric Effect in Polarized Poly (vinylidene Fluoride)**, *Jap. J. of Appl. Phys.* 8, 1969.

KHURI-YAKUB, B.T., et al., **Silicon micromachined ultrasonic transducers**, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 39, pp. 2883 - 2887, 2000.

KHURI-YAKUB, B.T., OLMER, O., **Capacitive micromachined ultrasonic transducers for medical imaging and therapy**, *J. Micromech. Microeng.*, Vol 21, 2011.

KINO, G. S., **Acoustic waves: devices, imaging, and analog signal processing**, Prentice-Hall, Inc., USA, 1987.

KINSLER, L. E., et al, **Fundamentals of Acoustics**, John Wiley & Sons, USA, 1982.

KLICKER, K. A., BIGGERS, J. V., e NEWNHAM, R. E., **Composites of PZT and Epoxy for Hydrostatic Transducer Applications**, *J. Am. Cer. Soc.* 64, pp. 5-9, 1981.

KUPNIK, M., et al, **Finite Element Analysis of Fabrication Related Thermal Effects in Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers**, IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 938-941, 2006.

KUPNIK, M., et al, **Finite Element Analysis of Stress Stiffening Effects in CMUTS**, IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, pp. 487-490, 2008.

KWAN K. P., HYUNJOO L., MARIO K. e B. T. KHURI-YAKUB, **Fabrication of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers via Local Oxidation and Direct Wafer Bonding**, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 20, pp.95-103, 2011.

LANGEVIN, P., **French Patent 505.703**, 1920.

LEISSA, A.W., **Vibration of Plates**, NASA SP-160, NASA, Washington, 1969.

LESTER, W. S., JIN-SONG, S., **Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems: Models and Measurements**, Springer, USA, 2007.

LIPPMAN, G., **Sur le principe de la convection de l'électricité ou second principe de la théorie des phénomènes électriques**, C. R. Acad. Sc. Paris, tome 92, 1881.

LOBONTIU, N., GARCIA, E., **Mechanics of Microelectro-mechanical Systems**, Kluwer Academic Publishers, New York, 2005.

LOBONTIU, N., GARCIA, E., **Mechanics of Microelectromechanical Systems**, Springer Science + Business Media, Inc, USA, 2005.

LOCTITE, <http://www.loctiteconsumo.com.br/pt/produtos/superbonder/liquidos/precisao.html>, acesso em 16/08/2014.

LORENZ, H., et al. , **SU8 : A low-cost negative resist for MEMS**, EPON MicroMechanics Europ MME 96, 1996.

LOTTI, R. S., et al, **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos**, R Dental Press Ortodon Ortop Facial, v. 11, n. 2, p. 35-43, 2006.

LPKF, <http://www.lpkf.com/products/rapid-pcb-prototyping/lds/index.htm>, acessado em 16/08/2014.

MATSUMOTO, E. Y., **Matlab 6: fundamentos de programação**. Editora Érica, Brasil, 2001.

MENDONÇA, L.G.D., **Desenvolvimento de um micro-transdutor acústico capacitivo**, tese de doutorado, escola politécnica da usp, 2013.

MICROCHEM, SU-8 2000 **Permanent epoxy negative photoresist processing**, retirado de: <http://184.168.52.107/Prod-SU82000.htm>, acessado em 26/01/2012.

NASCIMENTO, A.R.Z., **Circuitos integrados de transimpedância integrados a fotodiodos**, Rev. Cienc. Per. Tel., Vol.2 n.2, pp. 32-39, 1999.

NIKOOZADEH, A., BAYRAM, B., e KHURI-YAKUB, B. T., **Analytical Calculation of Collapse Voltage of CMUT Membrane**, *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp 256-259, 2004.

OLIVEIRA, V. I., **Propriedades ópticas de filmes finos de silício amorfo hidrogenado dopados com érbio**. 2005. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ORALKAN, O., et al. **Experimental characterization of collapse-mode CMUT operation**, *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, IEEE Transactions on, vol. 53, no. 8, pp. 1513- 1523, 2006.

ORALKAN, O., et al. **Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Next Generation Arrays for Acoustic Imaging?**, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.*, vol. 49, pp. 1596-1610, 2002.

PARK, K. K., et al, **Capacitive micromachined ultrasonic transducers for chemical detection in nitrogen**, *Appl. Phys. let.*, Vol. 91, 2007.

PARK, K. K., LEE, H., KUPNIK, M., e Khuri-Yakub, B. T., **Fabrication of capacitive micromachined ultrasonic transducers via local oxidation and direct wafer bonding**, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 20, pp. 95-103, 2011.

PHILIPS, <http://www.healthcare.philips.com/main/products/ultrasound/technologies/purewave.wpd>, acesso em 30/01/2012.

PRATAP, R., ARUNKAMAR, A., **Material Selection for MEMS Devices**, *Indian Journal of Pure and App. Phys.*, Vol. 45, pp. 358-367, 2007.

RAICHEL, D. R., **The science and applications of acoustics**, Springer, USA, 2006.

RAYLEGH, B., **The Theory of Sound**, vol. 2, 2^oed., Dover publication, USA, 1945.

ROBERTS, S., **Dielectric and piezoelectric properties of barium titanate**, *Phys. Rev.* 71, pp. 890-895, 1947.

RODE, <http://www.rodemic.com/software/roderec>, acesso em 16/08/2014

ROSENBAUM, J. F., **Bulk Acoustic Wave Theory and Devices**, Artech House, USA, 1988.

ROSSING, T.D., FLETCHER, N.H., **Principles of Vibration and Sound**, Springer, USA, 1994.

SADIKU, M. N. O., **Elementos de Eletromagnetismo**, Bookmann, São Paulo, 2004.

SENTURIA, S. D., **Microsystem Design**, Kluwer Academic Publishers, USA, 2000.

SKF, <http://www.skf.com/br/products/condition-monitoring/basic-condition-monitoring-products/vibration-measurement-tools/index.html>, acessado em 16/08/2014.

STEPHANISHEN, P. R., **Transient radiation from pistons in an infinite planar baffle**, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 49, pp. 1629-1638, 1971.

SUZUKI, K., HIGUCHI, K., e TANIGAWA, H., **A silicon electrostatic ultrasonic transducer**, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.*, vol. UFFC-36, pp. 620-627, 1989.

SZABO, T. L., **Diagnostic ultrasound imaging: inside out**, MA Elsevier Academic Press, 2004

SZE, S. M., **VLSI Technology**, McGraw-Hill Pub. Co, USA, 1988.

TANAKA, H., MACHIDA, S., HASHIBA, K., KOBAYASHI, T., **Acoustic characteristics of CMUT with rectangular membranes caused by higher order modes.**, ultrasonics Symposium, pp. 434 – 437, 2009.

TI, retirado de: <http://www.ti.com/lit/ds/sbos006/sbos006.pdf>, acesso em 16/08/2014.

TUPHOLME, G. E., **Generation of Acoustic Pulses by Baffled Plane Pistons**, *Mathematika*, vol. 16, pp.209-224, 1969.

VAITHILINGAM, S., et al. **Three-dimensional photoacoustic imaging using a two-dimensional CMUT array**, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.*, vol. 56, pp. 2411-2419, 2009.

WEI CHANG, M. M., et al., **Polymer-based Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUT) for Micro Surgical Imaging Applications**, Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, pp. 61-65, 2006.

WEIGHT, J. P., **Ultrasonic beam structures in fluid media**. *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 76, n. 4, pp. 1184-1191, 1984.

WONG, S. H., et al, **Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers for High Intensity Focused Ablation of Upper Abdominal Tumors**, *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp 841-844, 2006.

WYGANT, O., et al, **An Integrated Circuit With Transmit Beamforming Flip-Chip Bonded to a 2-D CMUT Array for 3-D Ultrasound Imaging**, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.*, vol. 56, pp-2145-2155, 2009.

WYGANT, O., et al, **Integration of 2D CMUT Arrays with Front-End Electronics for Volumetric Ultrasound Imaging**, *ieee transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 55, no. 2, 327-342, 2008.

XIZE, N., et al, **Characterizing and Patterning of PDMS-Based Conducting Composites**, *Adv. Mater.*, Vol 19,pp 2682–2686,2007.

YARALIOGLU, G. G., ERGUN, A. S.e KHURI-YAKUB, B. T, **Finite-element analysis of capacitive micromachined ultrasonic transducers**, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 52, no. 12, pp. 2185-2198, 2005.

YOUNG, W. C., BUDYNAS, R. G., **Roark's Formulas for Stress and Strain**. McGraw-Hill, USA, 2002.

ZHUENG, X., et al, **Wafer-Bonded 2-D CMUT Arrays Incorporating Through-Wafer Trench Isolated Interconnects with a Supporting Frame**, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control