

**DIEGO MARTINS DE SANTANA  
JOÃO PAULO DO VALE**

**MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DE UM CMUT PARA MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS**

São Paulo  
2010

**DIEGO MARTINS DE SANTANA  
JOÃO PAULO DO VALE**

**MODELAGEM E CONSTRUÇÃO DE UM CMUT PARA MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS**

Relatório apresentado a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
para a disciplina PMR2550 – Projeto de Conclusão de Curso II

Área de concentração:  
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Cury Ibrahim

São Paulo  
2010

## FICHA CATALOGRÁFICA

Vale, João Paulo do

Modelagem e construção de um CMUT para medição de distâncias / J.P. do Vale, D.M. de Santana. -- São Paulo, 2010.  
77 p.

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

1. Conversão eletromecânica de energia I. Santana, Diego Martins de II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.

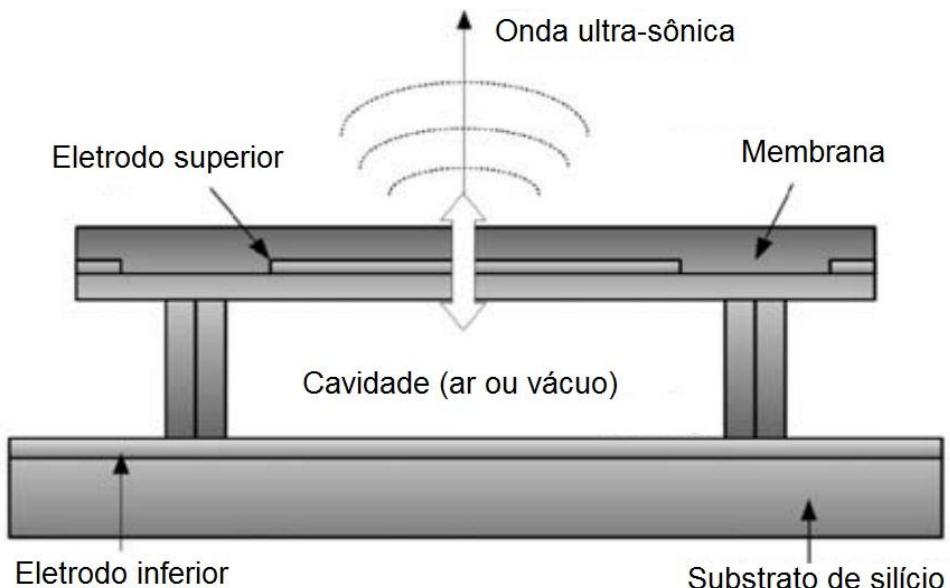
## Sumário

1.	Introdução.....	1
1.1.	Revisão Bibliográfica.....	2
2.	Conceitos Básicos .....	4
2.1.	Ultra-som.....	4
2.2.	Natureza do ultra-som.....	4
2.2.1.	Caracterização do ultra-som .....	5
2.2.2.	Efeitos de propagação do ultra-som.....	6
2.2.2.1.	Efeitos entre dois ou mais meios.....	6
2.2.2.3.	Efeitos ao longo de um meio .....	8
2.3.	Eletromecânica .....	10
2.3.1.	Capacitância entre dois meios .....	10
2.3.2.	Força eletrostática entre as placas de um capacitor .....	12
2.4.	Membrana .....	12
2.5.	Microfabricação.....	13
2.5.1.	Deposição de material.....	13
2.5.2.	Litografia.....	14
2.5.3.	Micro-usinagem .....	15
2.5.4.	Bonding .....	17
3.	Modelagem dos CMUTs .....	19
3.1.	Modelagem do campo de pressão.....	19
3.2.	Modelagem das Estruturas em Forma de Membrana .....	31
4.	Fabricação do protótipo .....	34
4.1.	Plano de fabricação .....	34
5.	Resultados.....	37
5.1.	Modelagens.....	37
5.1.1.	Análise modal.....	41

5.1.2. Seleção de materiais .....	42
5.2. Simulações.....	43
5.2.1. Simulação da membrana.....	44
5.2.2. Interações Eletromecânicas .....	47
5.3. Fabricação no LNLS .....	50
5.3.1. Máscaras .....	51
5.3.2. Parte Inferior.....	53
5.3.3. Parte superior .....	63
5.3.4. União das partes .....	64
6. Análise e Discussão de Alguns Resultados.....	66
6.1. Resultados da Modelagem.....	66
6.2. Resultados da fabricação.....	67
7. Conclusões Finais .....	70
8. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	70
Referências.....	71

## 1. Introdução

Um Transdutor de Ultra-som Capacitivo Microfabricado (CMUT) é composto basicamente por uma membrana metalizada (eletrodo superior) suspensa sobre um substrato de silício altamente dopado (eletrodo inferior). À medida que uma tensão alternada é aplicada entre os eletrodos surgem forças de atração ou repulsão causando oscilações da membrana e consequentemente a emissão de ultra-som, como ilustrado pela **Figura 1**. Esta tecnologia explora os efeitos eletrostáticos que existem entre duas placas eletricamente carregadas.



**Figura 1- Princípio de funcionamento de um CMUT.**

Atualmente, os CMUT's têm sido preferência em transdutores ultra-sônicos por possuir melhor casamento acústico com os meios de propagação, maiores coeficientes de transferência de energia tanto na emissão como na recepção de ondas, facilidade de fabricação, maior integração com circuitos eletrônicos e a redução dos custos com relação aos piezelétricos.

Devido a estas características, o CMUT tem sido altamente empregado em tecnologias que utilizam o ar como meio de propagação do ultra-som. Exemplos de aplicações são as medições de distâncias, a detecção de presença, medição de superfícies, orientação de peças, sinalização de colisão, vigilância de ambientes,

medição de vazões e investigação de propriedades de materiais por medição da absorção do som.

O objetivo deste trabalho consiste em três partes principais. A primeira é a modelagem do CMUT, envolvendo as etapas de análise das dimensões e materiais para fabricação, e simulação em elementos finitos através do programa ANSYS. A segunda pode ser considerada como a fabricação de protótipos através das técnicas de litografia, deposição, e de micro-usinagem, disponíveis nas instalações do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), localizado em campinas. E a terceira será a medição de distâncias e análise do desempenho dos protótipos fabricados através dos sinais obtidos.

### **1.1. Revisão Bibliográfica**

Em 1917, Langevin [1] reproduziu e detectou ondas ultra-sônicas através das vibrações de um cristal de quartzo à medida que este era submetido a uma corrente elétrica alternada de alta freqüência.

Desta forma, apareceram os primeiros dispositivos a utilizar da tecnologia do ultra-som, os transdutores piezelétricos. Suas primeiras aplicações foram na área militar através de sonares para a detecção de submarinos, utilizando o método pulso-eco, durante a Primeira Guerra Mundial [1][2]. Outras aplicações que logo ganharam destaque foram as utilizações do ultra-som na produção de imagens na medicina em 1930[2] e nas indústrias em 1940[1].

Logo após as primeiras aparições do ultra-som, deu-se início à pesquisas sobre o assunto e consequentemente à busca por novas tecnologias e materiais. A primeira geração de materiais para transdutores ultra-sônicos era composta pelos cristais piezelétricos como quartzo, sal de Rochelle e materiais magnetostrictivos como o níquel, até meados de 1940. Após uma intensa pesquisa durante a Segunda Guerra Mundial, surgiram as cerâmicas piezelétricas como o titanato de bário e o titanato zirconato de chumbo (PZT) com grande capacidade em converter corrente elétrica em vibrações mecânicas[2][1].

Nos anos seguintes devido aos avanços tanto na tecnologia de análise de sinais quanto na evolução dos materiais, surgiram diversas outras aplicações para o uso do

ultra-som as quais podem ser classificadas em sensoriamento, como a ultrasonografia médica, e atuação, como soldagem por ultra-som [3][4].

Com uma vasta gama de aplicações, o desenvolvimento científico se intensificou e segmentou-se com o objetivo de aperfeiçoar as novas tecnologias de forma a buscar por resultados que atendessem da melhor maneira possível às exigências de cada aplicação. Algumas linhas de pesquisa têm direcionado seus esforços em aplicações médicas desenvolvendo as tecnologias que envolvem análise de sinais, reprodução de imagens e ultra-sons de altas freqüências ( $>1\text{MHz}$ ), e outras procuram dispositivos que permitem maior eficiência na transmissão do ultra-som através do ar e que trabalham em baixas freqüências (30KHz a 1MHz).

Algumas das preocupações dos cientistas estiveram relacionadas com o acoplamento acústico dos transdutores ao meio de propagação, pois este é um dos fatores determinantes na eficiência da emissão e recepção do sinal ultra-sônico. Assim, deu-se uma busca por métodos de casamento da impedância acústica entre os materiais e os meios de transmissão. Ao longo dessa busca foram descobertos meios de acoplamentos acústico através de camadas de revestimentos para os materiais piezelétricos, seguidos por materiais piezopolímeros como o fluoreto de polivinilideno (PVDF) e piezocompósitos[2][5].

Entretanto, com o surgimento de novas técnicas de fabricação, tornou-se possível a construção dos transdutores eletrostáticos que surgiram rapidamente em meados dos anos 90 como uma alternativa aos convencionais transdutores piezelétricos [6].

A idealização deste tipo de transdutor para a geração de ondas ultra-sônicas é mais antiga que o primeiro transdutor ultra-sônico criado. Porém limitações físicas da época impossibilitavam a implementação dos mesmos. Para viabilizar sua construção era necessário conseguir um campo elétrico na ordem de milhões de volts por centímetros ( $10^6\text{V/cm}$ ), para que forças maiores que um kilograma por centímetro quadrado fosse atingido, como o físico francês Paul Langevin havia constatado em 1915[2]. Novas tecnologias no processo de fabricação puderam contribuir com o surgimento dos transdutores eletrostáticos tornando-os competitivos em relação aos transdutores piezelétricos, pois tais tecnologias, como a microfabricação e técnicas de processamento do silício, permitiram atingir uma distância entre placas (gap) na ordem de micrômetros e a construção de membranas com geometria e propriedades mecânicas altamente precisas [2][7][6].

Assim, surgiram os CMUT's (Transdutores de Ultra-som Capacitivos Microfabricados) [6][8]. Em termos de pesquisa, tem-se estudado as diversas configurações dos arranjos de CMUT's quanto ao número de elementos e quanto à sua disposição em 1D, lineares e anelares, e em 2D, retangulares e circulares. Também tem-se analisados CMUT's côncavos e convexos para se obter melhor resolução e propagação das ondas no meio.

As aplicações que demonstram grande atratividade estão na área medicinal, devido à não interferência das ondas mecânicas aos tecidos vivos, assim a maior parte das pesquisas sobre esta tecnologia estão preocupadas em realizar um mapeamento volumétrico por ultrassonografia.

Todas estas tecnologias e pesquisas têm sido desenvolvidas no mundo, principalmente em países como os Estados Unidos na América do Norte, Itália e Alemanha na Europa, Taiwan, China, Japão e Coréia na Ásia. Porém no Brasil todos estes conhecimentos estão pouco difundidos e tem sido pouco explorados. A falta da pesquisa deste assunto no país e a grande aplicabilidade destes transdutores nos diversos ramos de atividades têm servido de motivação à realização deste trabalho.

## 2. Conceitos Básicos

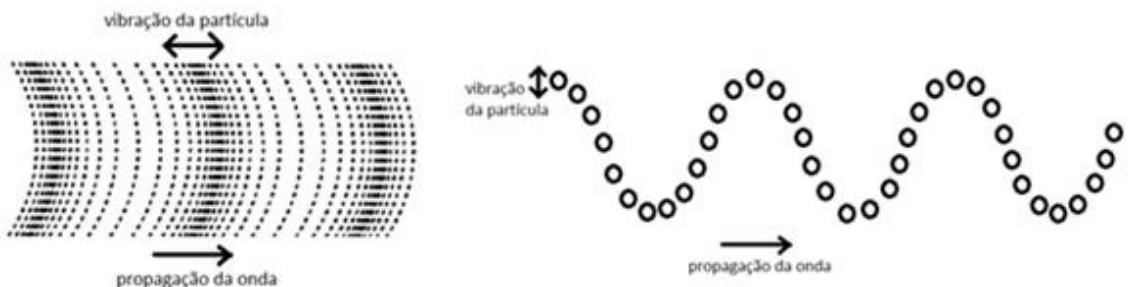
### 2.1. Ultra-som

Todo som é uma onda mecânica que utiliza de um meio material para se propagar, consequentemente não podendo ser transmitida através do vácuo. O ultra-som não é diferente, ele recebe este nome por se situar em uma faixa de freqüência do som, de 20Khz a 1Ghz, inaudível ao ser humano.

### 2.2. Natureza do ultra-som

Dentro das ondas mecânicas, o ultra-som pode ser classificado tanto como uma onda longitudinal, ou seja, uma onda que causa oscilações nas partículas no mesmo sentido do deslocamento da onda, ver **Figura 2(a)**, quanto como uma onda transversal,

aquelas que provocam oscilações nas partículas no sentido perpendicular ao sentido de propagação da onda, ver **Figura 2(b)**.



**Figura 2 - (a) Onda mecânica longitudinal, (b) onda mecânica transversal.**

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 sólidos, líquidos e gasosos, devido a presença de tensões de compressão e tração nos materiais.

#### 2.2.1. Caracterização do ultra-som

O som, assim como o ultra-som, possui características de ondas que são definidos a seguir:

- Comprimento de onda ( $\lambda$ ) – É a distância entre dois picos ou dois vales consecutivos, dado um instante de tempo.
- Amplitude (A) – É o máximo deslocamento a partir do ponto de equilíbrio que uma partícula sofre durante a passagem de um ciclo de onda.
- Período (T) – É o intervalo de tempo que uma partícula executa o movimento de um ciclo completo de onda.
- Potência (P) – É a energia total do feixe de onda sonora em um dado momento expressa em Watts.
- Freqüência (f) – É o número de ciclos que passam por uma partícula por unidade de tempo.

Essas grandezas podem ser relacionadas através de algumas equações como [9]:

$$f = \frac{2\pi}{T} \quad (2.1)$$

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.2)$$

Onde  $c$  é a velocidade da propagação da onda no meio.

### **2.2.2. Efeitos de propagação do ultra-som**

A propagação do som no meio foi descrito de forma didática no tópico 2.2, porém existem alguns efeitos que devem ser mencionados no escopo deste trabalho para ilustrar melhor a mecânica do fenômeno de propagação das ondas acústicas. Deve-se ressaltar que estes fenômenos serão expostos de maneira sucinta uma vez que não fazem parte dos objetivos principais do trabalho.

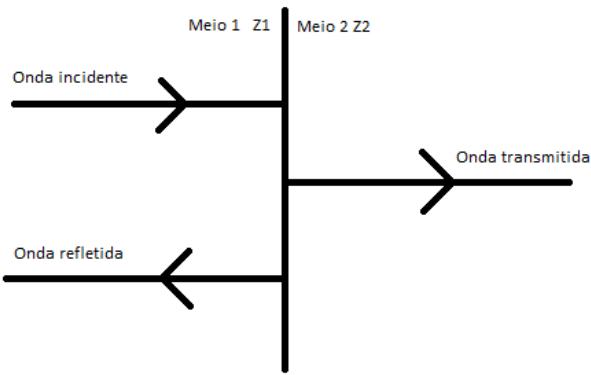
Os principais efeitos envolvendo a propagação entre dois meios ou mais são os de transmissão, refração e reflexão, e os que ocorrem dentro do mesmo meio são basicamente os de dispersão e atenuação, sendo o segundo o principal obstáculo da propagação do ultra-som em meio gasoso.

#### **2.2.2.1. Efeitos entre dois ou mais meios**

Primeiramente se faz necessário citar a existência de uma resistência encontrada pela onda sonora para se propagar em qualquer meio, a esta propriedade dá-se o nome de impedância acústica. A impedância acústica é uma característica do meio que é diretamente proporcional à densidade do mesmo e a velocidade de propagação do som no meio, equação 2.3.

$$Z = \rho \cdot v \quad (2.3)$$

Assim, pode-se falar no fenômeno de transmissão e reflexão do som entre dois meios 1 e 2. Estes fenômenos normalmente são detalhados juntos por serem complemento um do outro como será vista rapidamente a seguir. Considerando a fronteira de interação entre ambos, segundo **Figura 3**, e aplicando as equações de equilíbrio da intensidade acústica pode-se equacionar os seguintes fenômenos.



**Figura 3 - Interação da onda acústica com a fronteira entre dois meios.**

Considerando a definição do coeficiente de transmissão ( $T$ ) como sendo a razão entre a intensidade da onda acústica transmitida para o meio 2 pela intensidade da onda incidida do meio 1 e a definição do coeficiente de reflexibilidade ( $R$ ) como a razão entre intensidade da onda refletida e a intensidade da onda incidida, tem-se:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.4)$$

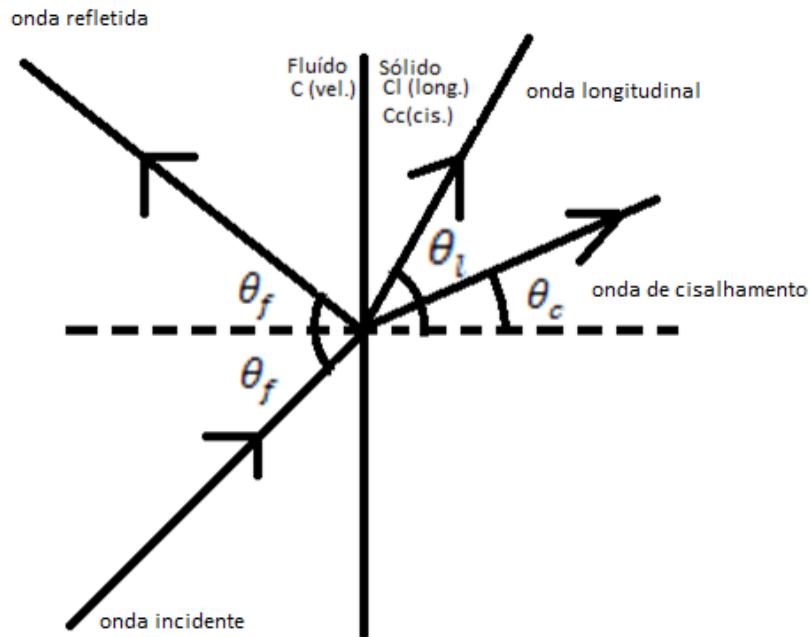
$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.5)$$

Onde,  $Z_1$  e  $Z_2$  são as impedâncias acústicas dos meios 1 e 2 respectivamente.

A refração é um fenômeno um pouco mais curioso, pois uma onda longitudinal sendo transmitida de um meio fluídico para um meio sólido ou entre dois sólidos pode dar origem a ondas de cisalhamento dependendo do ângulo de incidência. Este fenômeno pode ser descrito através da Lei de Snell que relaciona o seno do ângulo entre a normal da superfície e a direção da onda com a velocidade de propagação da onda no meio, equação 2.6, como pode ser observado na **Figura 4**.

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_f}{C_f} = \frac{\operatorname{sen}\theta_l}{C_l} = \frac{\operatorname{sen}\theta_c}{C_c} \quad (2.6)$$

Onde  $f$ ,  $l$  e  $c$  os índices das ondas no fluído, a longitudinal no sólido e a de cisalhamento no sólido respectivamente.



**Figura 4 - Surgimento da onda de cisalhamento com incidência de uma onda longitudinal na fronteira entre o meio fluídico e um meio sólido.**

### 2.2.3. Efeitos ao longo de um meio

Os efeitos de espalhamento e atenuação de modo geral causam na onda sonora uma diminuição da intensidade da onda na medida que esta se propaga para longe do ponto de emissão.

O primeiro está relacionado com a propagação da onda em todos os sentidos. Este espalhamento pode variar com o tipo de onda ultrasônica que for emitida, podendo ser esférica, semi-esférica, cônica, um feixe, entre outros formatos. Por exemplo, se o som estiver se propagando como uma onda esférica uniforme e considerarmos que a mesma num dado momento estiver atravessando uma casca esférica de raio  $R_i$  e de intensidade  $I_i$ , teremos, uma potência total de:

$$P = 4 \cdot \pi \cdot R_i^2 \cdot I_i \quad (2.7)$$

Se considerarmos um meio sem perdas, a potência total da onda será constante. Assim, num outro momento quando a mesma onda passar uma casca esférica de raio  $R_f = 2xR_i$ , a intensidade da onda será:

$$I_f = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot R_f^2} \quad (2.8)$$

Assim, substituindo o  $P$  e  $R_f$  temos:

$$I_f = \frac{I_i}{4} \quad (2.9)$$

Ou seja, cada vez que a distância do ponto de emissão dobra, a intensidade da onda cai para um quarto só devido ao espalhamento da energia.

Mas esta diminuição da intensidade de energia só ocorre devido às características da fonte de emissão, dimensões, formato, configuração do conjunto de emissores, etc. Porém há perdas em virtude do meio de propagação e suas propriedades que não podem ser deixadas de lado, principalmente em transmissões do som no ar. A atenuação é um conjunto de perdas que podem ser:

- Por meio da viscosidade do meio: Através do atrito entre 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.
- Térmica: Devido à propagação de uma onda mecânica como a do som, há regiões de compressão e consequentemente o aumento de pressão e temperatura e regiões de expansão acompanhadas pela diminuição de pressão e de temperatura. Assim, surge um fluxo de energia na forma de calor que acaba por amortizar a propagação da onda.
- 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.

Todas estas perdas são diretamente proporcionais ao quadrado da freqüência, ou seja, as freqüências altas acabam se atenuando e dissipando no ar muito mais rápido do que as freqüências menores, atingindo menores distâncias. Um exemplo clássico são os carros bastante equipados com aparelhos de som automotivo. Eles são

equipados com emissores de som audíveis (auto-falantes, tweeters, etc.) em várias faixas de freqüência, mas pessoas presentes a uma distância maior do automóvel conseguem ouvir apenas a parte grave do som composto, ou seja, fortes estrondos de baixa freqüência.

A perda por relaxação no ar é significativamente maior que as demais, podendo desprezar as perdas por viscosidade e térmicas. Este tipo de dissipação da onda possui grandes variações dependendo da umidade relativa, pressão, temperatura do ambiente e freqüência, como já foi mencionado.

Uma simplificação para o cálculo do coeficiente de atenuação considerando ar seco e para freqüências acima de 10 KHz é dada [16] através da equação 2.10.

$$\alpha = 4,66 \cdot 10^{-13} \cdot w^2 \quad (2.10)$$

Onde  $w$  é a velocidade angular da onda no meio.

E sua utilização se dá pela seguinte forma:

$$P(r, t) = P_0(r, t) \cdot e^{-\alpha r} \quad (2.11)$$

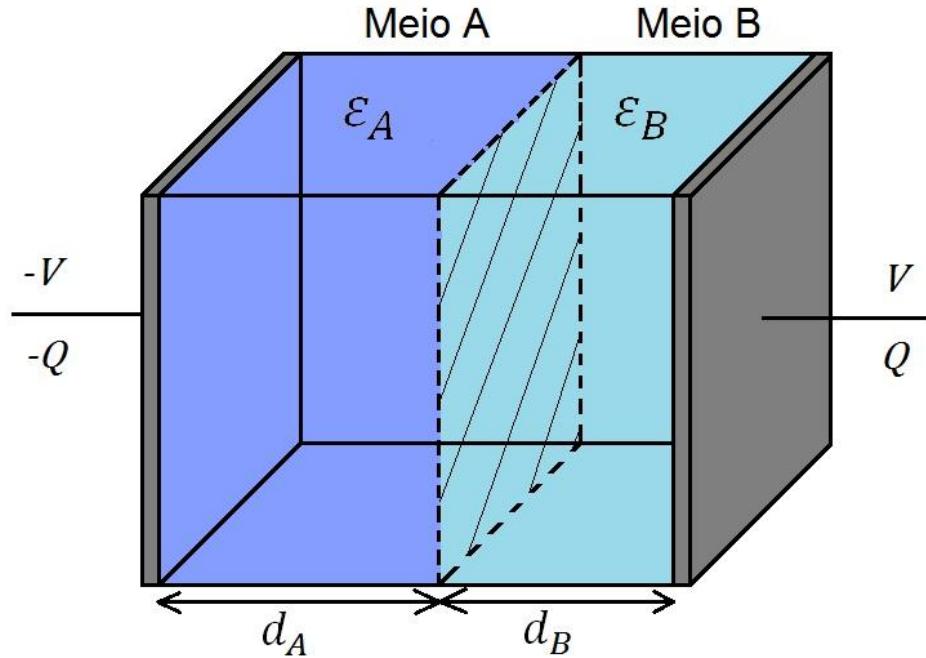
Onde  $P_0$  é a resposta harmônica da pressão no ponto observado em um meio sem perdas,  $r$  é a distância do ponto até a fonte de emissão.

## 2.3. Eletromecânica

### 2.3.1. Capacitância entre dois meios

Considerando as placas do capacitor da **Figura 5** separadas por dois meios diferentes e, consequentemente, duas constantes dielétricas ( $\kappa$ ) diferentes, calculamos a capacidade equivalente entre eles como dois capacitores associados em série[9][10]:

$$\epsilon_i = \kappa_i \cdot \epsilon_0 \quad (2.12)$$



**Figura 5 - Desenho esquemático de um capacitor com dois dielétricos.**

$$C_{eq} = \frac{C_a \cdot C_b}{C_a + C_b} \quad (2.13)$$

$$C_i = \frac{\epsilon_i \cdot A_i}{d_i} \quad (2.14)$$

Substituindo 2.14 em 2.13:

$$C_{eq} = \frac{\frac{\epsilon_a \cdot A_a}{d_a} \cdot \frac{\epsilon_b \cdot A_b}{d_b}}{\frac{\epsilon_a \cdot A_a}{d_a} + \frac{\epsilon_b \cdot A_b}{d_b}} = \frac{A \cdot \epsilon_a \cdot \epsilon_b}{\epsilon_a \cdot d_b + \epsilon_b \cdot d_a}$$

E substituindo 2.12 vem:

$$C_{eq} = \frac{A \cdot \epsilon_0^2 \cdot \kappa_a \cdot \kappa_b}{\kappa_a \cdot \epsilon_0 \cdot d_b + \kappa_b \cdot \epsilon_0 \cdot d_a} \quad (2.15)$$

### 2.3.2. Força eletrostática entre as placas de um capacitor

A energia armazenada em um capacitor de capacidade  $C$  é dada por [9][10]:

$$E = \frac{C \cdot V^2}{2} \quad (2.16)$$

Assim a força entre as duas placas podem ser calculadas:

$$\begin{aligned} F \cdot \partial d &= \frac{\varepsilon \cdot A \cdot V^2}{2d} - \frac{\varepsilon \cdot A \cdot V^2}{2(d-\partial d)} = \varepsilon \cdot A \cdot V^2 \cdot \left( \frac{-\partial d}{2d^2 - 2d \cdot \partial d} \right) \\ F \cdot \partial d &= \frac{\varepsilon \cdot A \cdot V^2}{2d^2} = \frac{C \cdot V^2}{2d} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Com as relações 2.15 e 2.17 a força entre as placas de um capacitor separado por dois meios pode ser calculada. É importante ressaltar que por trás destes cálculos há muitas hipóteses simplificadoras que foram adotadas e vários efeitos negativos como correntes de fuga e capacitâncias parasitas presentes no transdutor foram desconsiderados.

Futuramente a equação 2.17 poderá ser usada para análises mais detalhadas permitindo a modelagem da parte elétrica do CMUT.

## 2.4. Membrana

A membrana é a parte do transdutor que está em contato direto com o meio. Com a membrana em movimento é possível impor uma pressão e uma velocidade sobre as partículas deste meio, e com o controle desse movimento as ondas de ultrassom podem ser emitidas. De forma contrária, a incidência de uma onda acústica sobre a membrana coloca-a em movimento. O controle do movimento da membrana é feito através dos efeitos eletrostáticos descritos no tópico 2.3.2, onde a placa condutora que se movimenta é solidária à membrana. Por esses motivos a análise do comportamento é fundamental para a realização desse trabalho.

## 2.5. Microfabricação

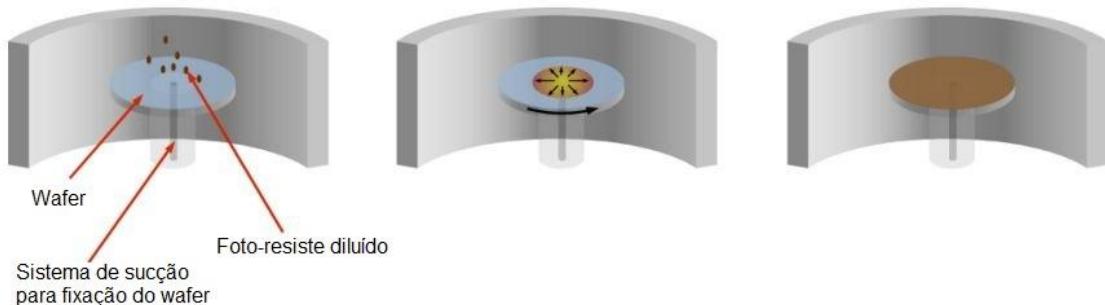
Por serem dispositivos muito pequenos, os processos de fabricação de MEMS são diferenciados. Esses processos foram herdados da microeletrônica com algumas adaptações. São processos bem controlados e geralmente possuem várias etapas intermediárias como pré-aquecimento, pós-aquecimento, cura, etc., e por isso, esses processos serão brevemente apresentados. Primeiramente é selecionado o material que serve de base estrutural para a construção do dispositivo, o substrato. O material mais utilizado atualmente como substrato é o silício monocristalino de alta pureza, denominado wafer, por ser um material de boa rigidez estrutural e por conter orientações cristalográficas bem definidas. Na maioria das vezes esses processos são feitos seguindo uma seqüência básica: Primeiro a deposição de material, seguida da litografia e depois pela micro-usinagem por corrosão química. Existem também outras técnicas que não se encaixam em nenhuma dessas categorias, como o bonding, que é a colagem de duas metades pré-fabricadas. Outras dessas técnicas não serão utilizadas na fabricação do protótipo e portanto não serão abordadas neste trabalho.

### 2.5.1. *Deposição de material*

Podem ser imaginadas diversas maneiras de depositar material na fabricação do dispositivo, fisicamente ou quimicamente. É importante o depósito de camadas finas de materiais diferentes do substrato para tirar vantagens de outras propriedades de materiais. Para que possa ser realizada a litografia (processo que será descrito adiante no trabalho) é feito o depósito de material polimérico no estado líquido sob a superfície do dispositivo pela técnica de spin-coating.

A técnica de spin-coating visa distribuir o material líquido homogeneamente pela superfície de aplicação. O material é colocado de maneira aleatória sob a superfície, próximo à região central, e depois esta é colocada para girar a uma velocidade relativamente alta, espalhando o material devido a sua inércia na rotação. Com isso é possível espalhar o material com boa homogeneidade e também é possível obter espessuras bem finas, da ordem de micro-metros. Os parâmetros para se controlar são a velocidade de rotação e o tempo de duração da rotação, e estes variam conforme as propriedades físicas do material utilizado e a espessura desejada. Depois a superfície é

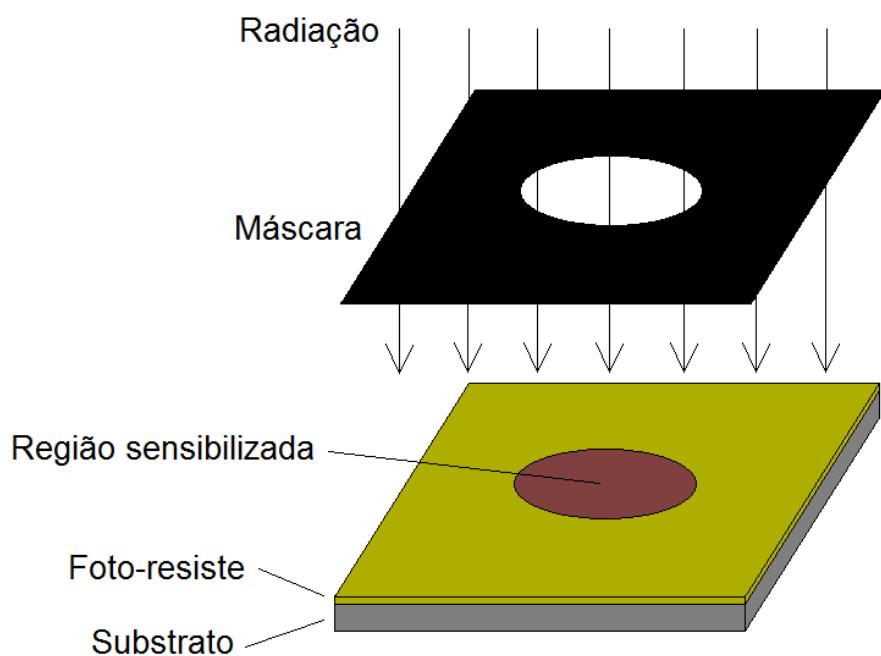
aquecida para a evaporação do solvente e a solidificação do material (etapa conhecida como baking).



**Figura 6 - Etapas do processo de spin-coating.**

### 2.5.2. *Litografia*

Essa etapa é realizada transmitindo a imagem de uma máscara para o dispositivo. Isso se dá com a incidência de radiação sobre a máscara, projetando sua imagem sobre um material polimérico foto-sensível. Se for utilizado um material foto-resiste positivo, a região atingida pela radiação projetada irá se tornar mais solúvel e poderá ser removida facilmente, sem que seja removida a região não atingida. Com o material foto-resiste negativo, o efeito da solubilização é contrário, sendo que a região atingida pela radiação se torna mais solúvel e a região não atingida é removida.



**Figura 7 - Esquema do processo de litografia.**

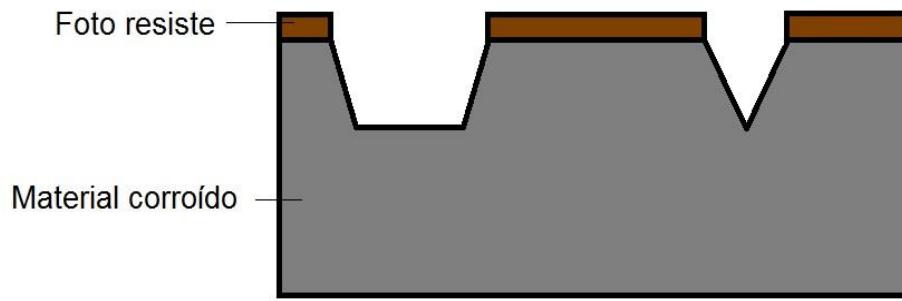
A máscara é produzida tendo como base um material transparente à radiação utilizada e revestida por uma película que barra a passagem da radiação. Nessa película é impresso o formato desejado ao dispositivo. Na microfabricação é muito comum aplicações sucessivas deste processo, portanto é necessário o uso de marcas de alinhamento nas máscaras para facilitar o posicionamento.

O equipamento utilizado para o processo é a expositora (ou alinhadora). Para cada foto-resiste deve ser utilizado um tipo de fonte de radiação. As dimensões da projeção também devem ser levadas em consideração na escolha da fonte de radiação, caso contrário haverão problemas de precisão devido à difração.

Existem três principais maneiras de posicionar a máscara em relação ao dispositivo na hora de executar o processo. A face da máscara com os detalhes pode ser colocada em contato com o foto-resiste (impressão por contato) ou pode ser posicionada em uma posição bem próxima, sem haver contato (impressão por proximidade). A impressão por contato permite a obtenção de uma resolução melhor do que a impressão por proximidade, mas tem a desvantagem de diminuir o tempo de vida útil da máscara. Também é possível projetar o formato da máscara por um sistema ótico de lentes (impressão por projeção). Com este método é possível atingir uma resolução ainda melhor que nos outros dois métodos, porém requer aparelhos mais caros e fontes de radiação de alta freqüência.

**2.5.3. *Micro-usinagem***

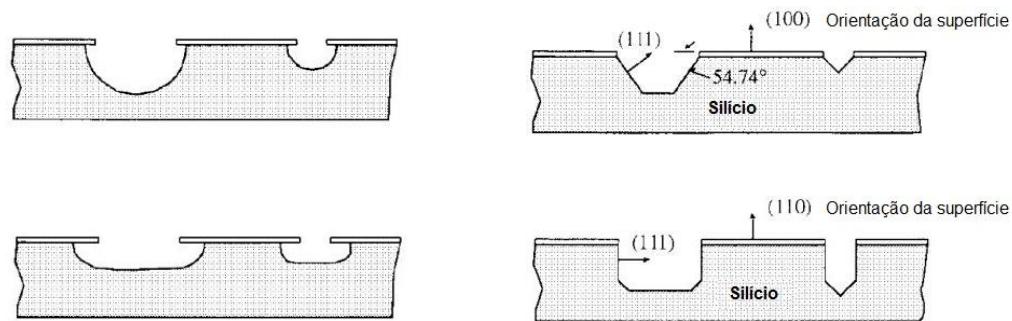
Nesta etapa, comumente conhecida por etching, é feita a remoção de material. Após o processo de litografia, haverão regiões cobertas e descobertas pelo polímero foto-resiste. Assim, com o uso do agente correto para o material a ser usinado, apenas as regiões desprotegidas pelo polímero são afetadas, promovendo a transferência da imagem da litografia para a camada do dispositivo.



**Figura 8 – Corrosão anisotrópica de material semi-protegido por material polimérico.**

A micro-usinagem segue diversos critérios de classificação. Ela pode ser executada por mecanismos físicos ou químicos. Um exemplo de como se realizar a micro-usinagem fisicamente é bombardeando íons sobre alvo, podendo-se desta maneira retirar material. Na micro-usinagem existe a classificação segundo a natureza do reagente: Há a corrosão úmida (wet etching) e a corrosão a seco (dry etching).

Outra classificação muito importante é segundo a natureza da corrosão. A corrosão pode ser isotrópica, onde a corrosão é praticamente igual em todas as direções, ou pode ser anisotrópica, onde segue direções preferenciais segundo orientações cristalográficas do material reagente.



**Figura 9 – Exemplos de corrosão isotrópica (lado esquerdo) e corrosão anisotrópica (lado direito).**

A micro-usinagem também é classificada quanto ao volume de remoção de material. A remoção em baixa profundidade é chamada de micro-usinagem de superfície (surface micromachining), e em profundidades maiores, onde o volume de material removido é maior, é chamada de micro-usinagem de volume (bulk micromachining).

É importante lembrar que deve ser feita a seleção de um reagente apropriado para cada material que se deseja remover, e o tempo da reação também deve ser controlado para que sejam obtidas as dimensões pretendidas.

#### 2.5.4. **Bonding**

A técnica de Bonding consiste na fabricação de duas metades de uma estrutura e a sua junção para a obtenção de estruturas mais complexas que não seriam possíveis pelos métodos simples ou seriam extremamente difíceis e onerosas.

Esta técnica é comumente utilizada quando se deseja obter cavidades ou canais, como no caso de canais micro fluídicos e sensores de pressão capacitivos. Ela pode ser utilizada tanto entre as etapas do processo de fabricação quanto como a última etapa do mesmo para o encapsulamento da estrutura final.

O Bonding pode ser utilizado na junção de materiais com propriedades iguais ou não ou de materiais totalmente diferentes. Porém, Bondings entre materiais diferentes podem trazer problemas em sua formação devido ao não casamento perfeito da grade cristalina ou expansão térmica diferente que provocam tensões e instabilidade entre as ligações químicas.

Os wafers podem ser juntados por diversas formas, mas existem dois tipos básicos de junção, a direta e a indireta. A forma direta, também conhecida por junção por fusão ou junção térmica, ocorre pelo simples contato entre as superfícies das duas partes, as quais se ligam quimicamente. Já a forma indireta se utiliza de uma camada intermediária entre as duas partes, que pode ser vidro, metais ou adesivos.

Apesar da diferença do tipo de junção, ambos os métodos podem se utilizar de pressão, elevação de temperatura, campos elétricos ou, até mesmo, uma combinação entre estas. Portanto o processo pode se tornar complexo, como nos casos em que as temperaturas podem chegar a mais de 1.200°C, sendo necessário o entendimento do comportamento dos gases enclausurados em cavidades em temperaturas elevadas para que estes não prejudiquem o processo de bonding.

Um dos problemas que devem ser ao menos mencionado no processo de Bonding é o alinhamento entre as metade, como é ilustrada na **Figura 10**. Esta dificuldade ocorre em certas estruturas que necessitam serem encaixadas

perfeitamente e para isso deve-se fazer uma marca para alinhamento entre as metades.



**Figura 10 - Alinhamentos possíveis no processo de bounding.**

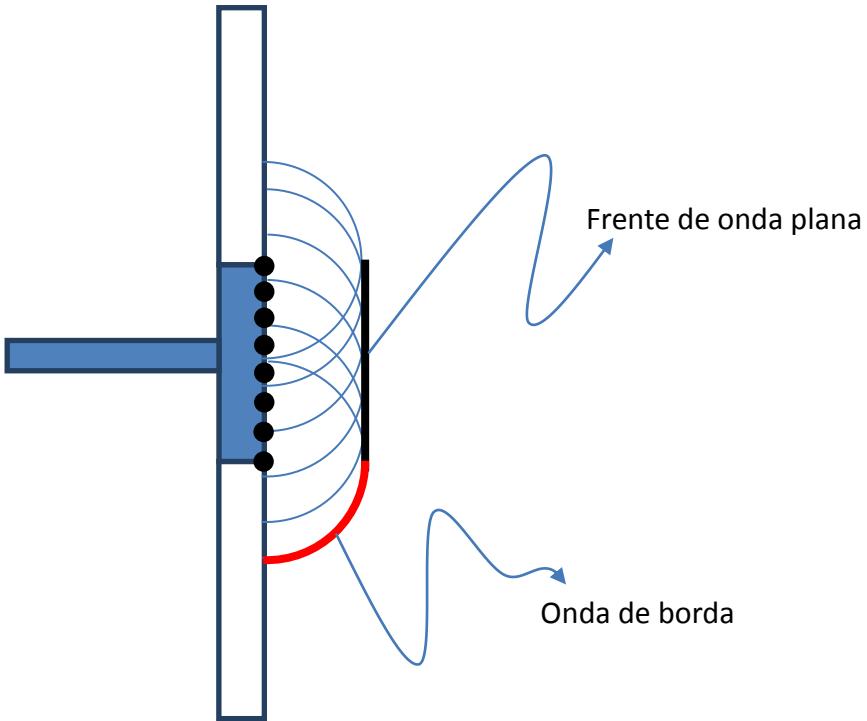
### 3. Modelagem dos CMUTs

Neste tópico serão apresentadas as considerações a serem feitas para tornar viável o estudo analítico dos componentes que estão envolvidos na emissão e transmissão do ultra-som, como a membrana e o campo de pressão devido à onda ultra-sônica. Também foi feita uma modelagem através do método de elementos finitos no software comercial ANSYS para comparação e crítica dos resultados para uma possível validação dos mesmos. Esta análise se faz necessária para determinar os principais parâmetros de projeto como dimensões da estrutura mecânica, propriedades do material relevantes ao problema e potência necessária para atingir uma distância desejada, por exemplo.

#### 3.1. Modelagem do campo de pressão.

A propagação da onda acústica se inicia com o movimento de uma superfície que desloca a camada de ar que se encontra junta a mesma elevando a pressão na região. Esta variação de pressão perturba as vizinhanças resultando na propagação do pulso. A explanação matemática do modelo será detalhada a seguir, porém, algumas etapas do processo da obtenção de integrais e utilização de ferramentas matemáticas não serão aprofundadas por não se tratar do escopo principal deste projeto.

Inicialmente, através do Princípio de Huygens, pode-se aproximar a superfície de emissão por emissões pontuais de ondas semi-esféricas como apresentado na **Figura 11**.



**Figura 11 - Formato da frente de onda e aproximação da superfície de emissão por pontos de emissão.**

Na **Figura 11** podem ser identificadas duas partes que compõe a onda acústica, a onda plana que se encontra na extremidade frontal e a onda de borda que se encontra nas laterais do campo de pressão.

Tomando um ponto genérico em um meio isotrópico (propriedades idênticas em todas as direções) e sem perdas pode ser associado a uma equação geral de onda no domínio da freqüência:

$$\nabla^2 p + k^2 p = -\delta(\vec{r}) \quad (3.1)$$

Onde  $\nabla$  é o gradiente de uma função,  $p$  é a função pressão em um dado ponto,  $k$  é o número de ondas e  $\delta$  é o Delta de Dirac e  $\vec{r}$  é a distância entre um ponto na superfície e o ponto observado.

A solução para essa equação, considerando uma onda esférica, é dada por:

$$p(r) = \frac{A}{r} e^{-jkr} \quad (3.2)$$

Onde  $A$  é a amplitude da onda na fonte de origem.

Para determinar o valor de  $A$  deve-se integrar a equação em um volume esférico de raio  $R$  e fazer o limite com o raio tendendo a zero. Assim, após algumas manipulações algébricas, foi possível encontrar o valor de  $A$  como  $\frac{1}{4\pi}$ . Conseqüentemente, a solução homogênea fica da seguinte maneira:

$$p(r) = \frac{1}{4\pi r} e^{-jkr} = G(r) \quad (3.3)$$

Podendo ser chamada também por Função de Green para este problema. Esta função pode ser desenvolvida também considerando um deslocamento de  $\vec{r}'$  da fonte obtendo-se a seguinte equação:

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} \quad (3.4)$$

Considerando o Teorema de Green que relaciona a integral de volume com a integral de superfície com orientação do vetor normal  $\vec{n}$  para dentro é dada por:

$$\int_V (\phi \cdot \nabla^2 \Psi - \Psi \cdot \nabla^2 \phi) dV = \oint_S (\phi \cdot \nabla \Psi - \Psi \cdot \nabla \phi) \cdot \vec{n} dS \quad (3.5)$$

Onde  $\phi$  e  $\Psi$  são funções quaisquer.

Uma observação deve ser feita devido ao fato desta relação ser válida somente para um volume de controle de extensão infinita que não englobe a fonte e o ponto a ser observado.

Assim, supondo que as duas funções satisfaçam a equação de onda,

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \implies \nabla^2 \phi = -k^2 \phi \quad (3.6)$$

$$\nabla^2 \Psi + k^2 \Psi = 0 \implies \nabla^2 \Psi = -k^2 \Psi \quad (3.7)$$

e substituindo na equação 3.5, tem-se:

$$\oint_S (\phi \cdot \nabla \Psi - \Psi \cdot \nabla \phi) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (3.8)$$

Onde as funções são:

$$\phi = p(\vec{R}) \quad (3.9)$$

$$\Psi = G(\vec{R}, \vec{R}') \quad (3.10)$$

Para a resolução da integral de superfície deve-se dividir a mesma em três partes, a borda que se estende até o infinito (3), a borda que acompanha o contorno da fonte (1) e a borda que envolve o ponto observado (2). Resultando na seguinte expressão:

$$\oint_{S_1, S_2, S_3} (p(\vec{R}) \cdot \nabla G(\vec{R}, \vec{R}') - G(\vec{R}, \vec{R}') \cdot \nabla p(\vec{R})) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (3.11)$$

Utilizando-se de ferramentas matemáticas para a simplificação da integral da equação 3.11 obteve-se:

$$p(\vec{R}) = \oint_{S_1} G(\vec{R}, \vec{R}') \cdot \nabla p(\vec{R}) \cdot \vec{n} dS \quad (3.12)$$

Considerando as equações de potencial de velocidade, equação 3.13, e a pressão devido a este potencial, equação 3.14, para a radiação acústica;

$$\vec{v} = -\nabla \varphi \quad (3.13)$$

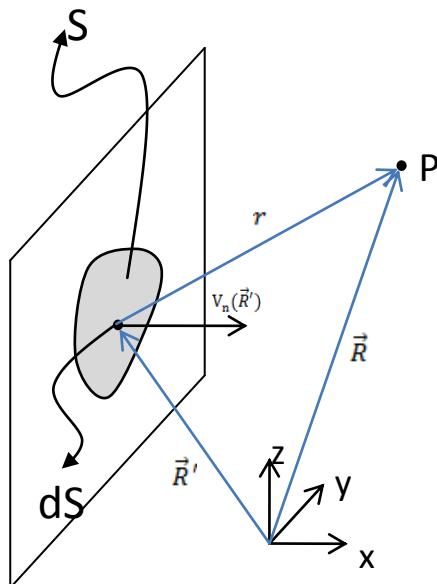
$$p = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} \gg p = jw\rho\varphi \quad (3.14)$$

$$\nabla p = jw\rho\vec{v} \quad (3.15)$$

E fazendo um ajuste da Função de Green. Esta aproximação deve ser feita uma vez que o vetor  $\vec{R}'$  da função  $G(\vec{R}, \vec{R}')$  percorre a borda externa da fonte de emissão e deseja-se analisar o efeito da parte interna da mesma. Assim, tem-se:

$$p(\vec{R}) = \frac{jw\rho}{2\pi} \oint_S \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot V_n(\vec{R}') dS \quad (3.16)$$

Onde  $V_n(\vec{R}')$  é a velocidade normal à superfície de um elemento infinitesimal de área  $dS$  distante de  $r=|\vec{R} - \vec{R}'|$  do ponto observado como mostra a **Figura 12**.



**Figura 12 - Esquema da posição do ponto P com relação à fonte de emissão.**

Esta equação recebe o nome de primeira Integral de Rayleigh e fornece uma resposta exata do campo acústico em função do campo de velocidades na superfície emissora.

Comparando as equações 3.14 e 3.16 pode-se chegar à equação do potencial de velocidades, dada por:

$$\varphi(\vec{R}) = \frac{1}{2\pi} \oint_S \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot V_n(\vec{R}') dS \quad (3.17)$$

Transformando do domínio de freqüência no domínio do tempo através da multiplicação da equação 3.17 por  $e^{jwt}$ , tem-se:

$$\varphi(\vec{R}, t) = \frac{1}{2\pi} \oint_S \frac{V_n(\vec{R}')}{r} e^{jw(t-r/c)} dS \quad (3.18)$$

Generalizando para uma excitação qualquer, a equação 3.18 é normalmente escrita da seguinte maneira:

$$\varphi(\vec{R}, t) = \frac{1}{2\pi} \oint_S \frac{\vec{v}_n(\vec{R}', t - r/c)}{r} dS \quad (3.19)$$

Para a resolução da equação 3.19 será assumida a emissão das ondas ultrasônicas por um pistão plano com velocidade uniforme em toda a superfície. Assim, tem-se o campo de velocidade do pistão em função de Deltas de Dirac da seguinte maneira:

$$\vec{v}_n(t - r/c) = \int_{-\infty}^{+\infty} v_n(\tau) \cdot \delta(t - r/c - \tau) d\tau \quad (3.20)$$

Substituindo a equação 3.20 na 3.19 e invertendo a ordem das integrais obtém-se:

$$\varphi(\vec{R}, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} v_n(\tau) \left[ \oint_S \frac{\delta(t - r/c - \tau)}{2\pi r} dS \right] d\tau \quad (3.21)$$

Adotando a definição,

$$\varphi_i(\vec{R}, t) = \oint_S \frac{\delta(t - r/c)}{2\pi r} dS \quad (3.22)$$

tem-se:

$$\varphi(\vec{R}, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} v_n(\tau) \cdot \varphi_i(\vec{R}, t - \tau) d\tau \quad (3.23)$$

Percebe-se que a função  $\varphi(\vec{R}, t)$  é a convolução entre a função temporal da velocidade da superfície do pistão plano  $v_n(\tau)$  e do potencial de velocidade de um elemento  $i$  situado no pistão, portanto:

$$\varphi(\vec{R}, t) = v_n(t) * \varphi_i(\vec{R}, t) \quad (3.24)$$

Onde o símbolo  $*$  é a operação de convolução.

Voltando à equação 3.14 que determina o campo de pressão dado um potencial de velocidades, tem-se:

$$p(\vec{R}, t) = \rho \frac{\partial \varphi(\vec{R}, t)}{\partial t}$$

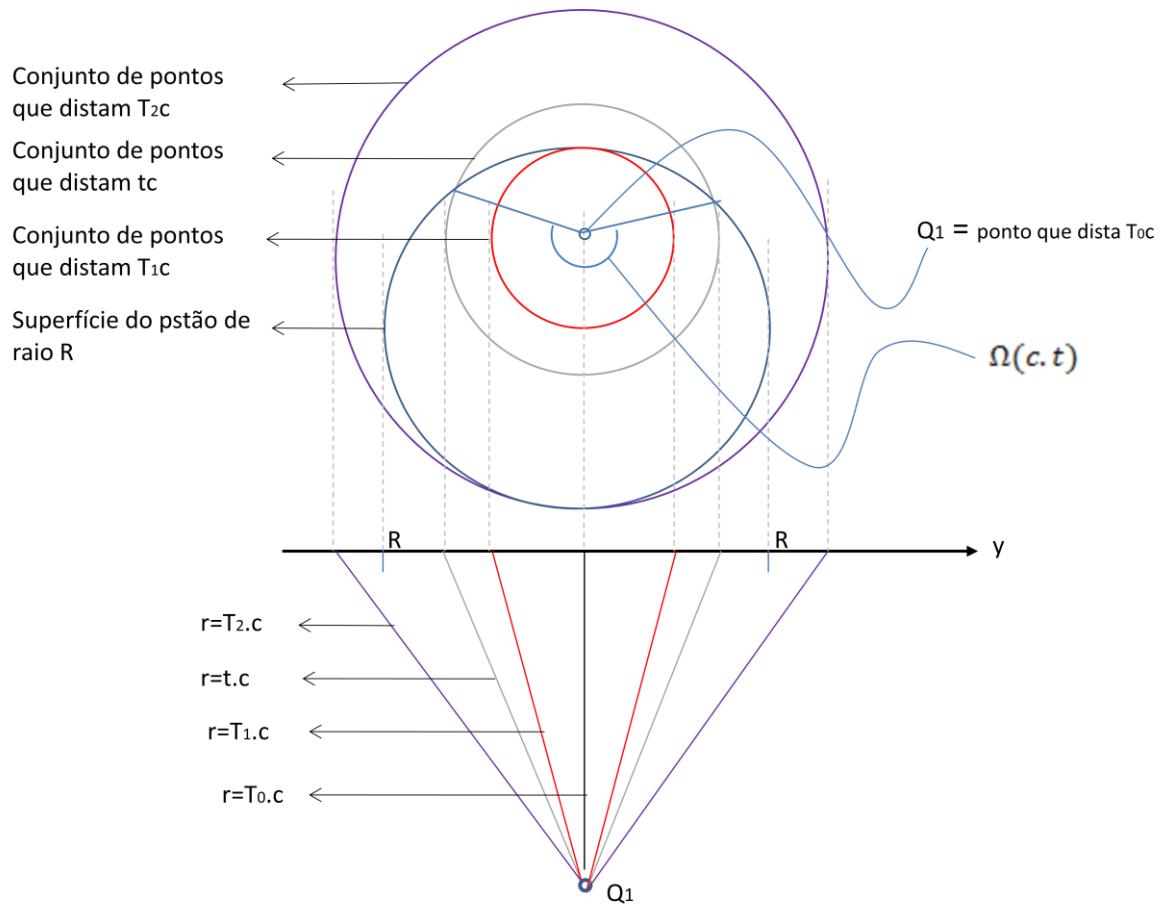
Substituindo a equação 3.24 na 3.14:

$$p(\vec{R}, t) = \rho \cdot v_n(t) * \frac{\partial \varphi_i(\vec{R}, t)}{\partial t} \quad (3.25)$$

Para encontrar a campo de pressão deve-se encontrar a solução para o potencial de velocidades  $\varphi_i(\vec{R}, t)$ . Weight [17] propôs uma solução através da equação 3.22:

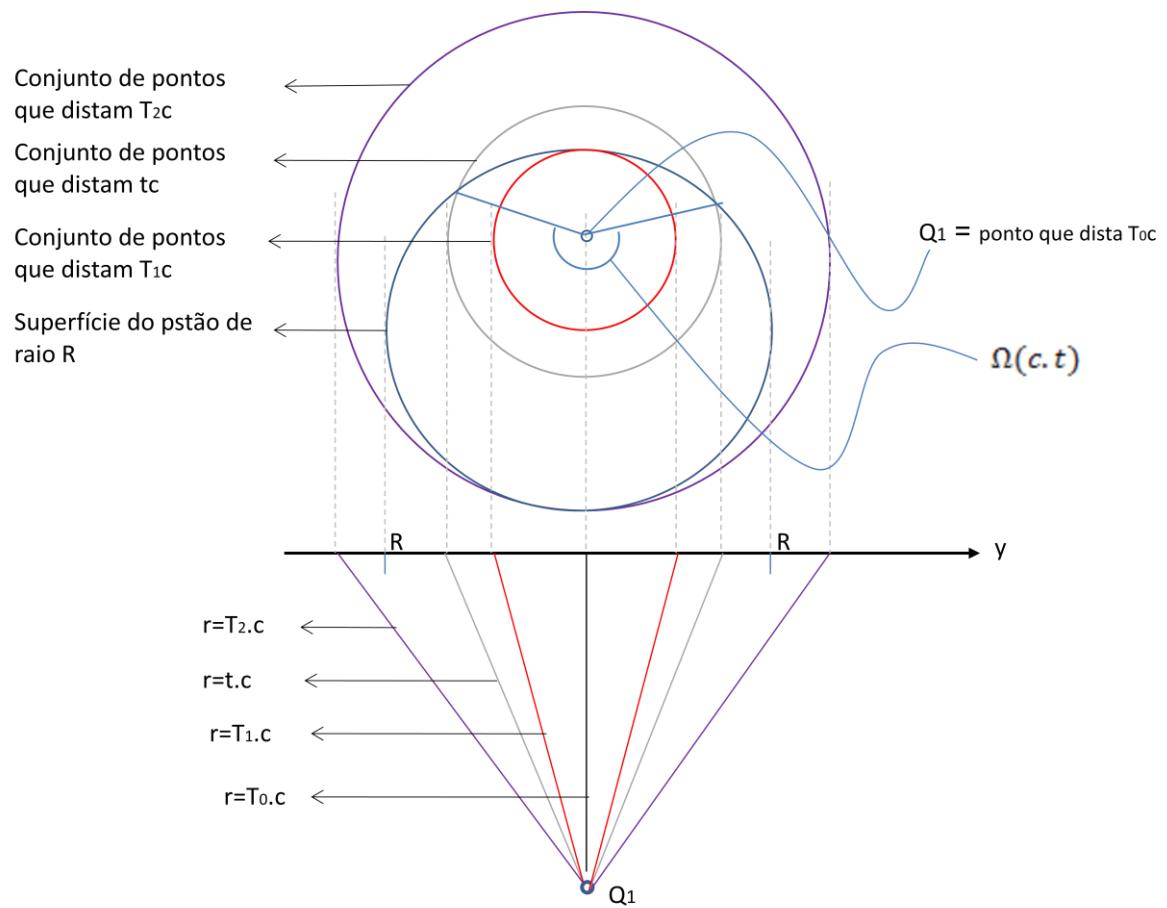
$$\varphi_i(\vec{R}, t) = \frac{c \cdot \Omega(c, t)}{2\pi} \quad (3.26)$$

Onde  $\Omega(c, t)$  é o ângulo do arco eqüidistante na superfície do pistão com relação ao ponto analisado como pode ser observado pela

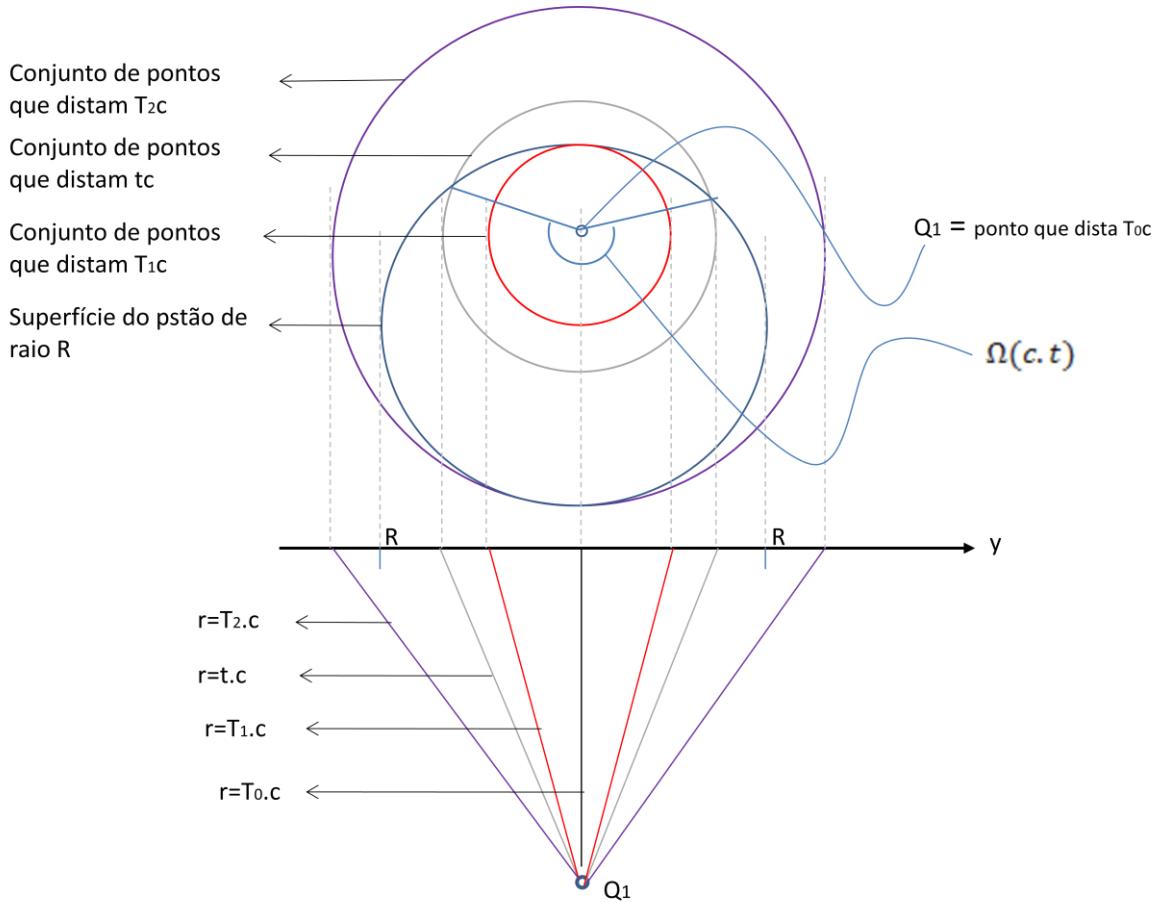


**Figura 13.**

Esta equação representa a soma das perturbações dos pontos da superfície do pistão, porém, como as distâncias entre o ponto observado e os elementos da superfície variam em um mesmo instante de tempo devido à geometria tridimensional, ondas acabam chegando defasadas umas das outras. Assim, em um dado instante de tempo  $t$  a equação só considera as perturbações dos elementos eqüidistantes do ponto observado, pois somente estas frentes de ondas chegaram ao mesmo tempo no ponto como pode ser observado na

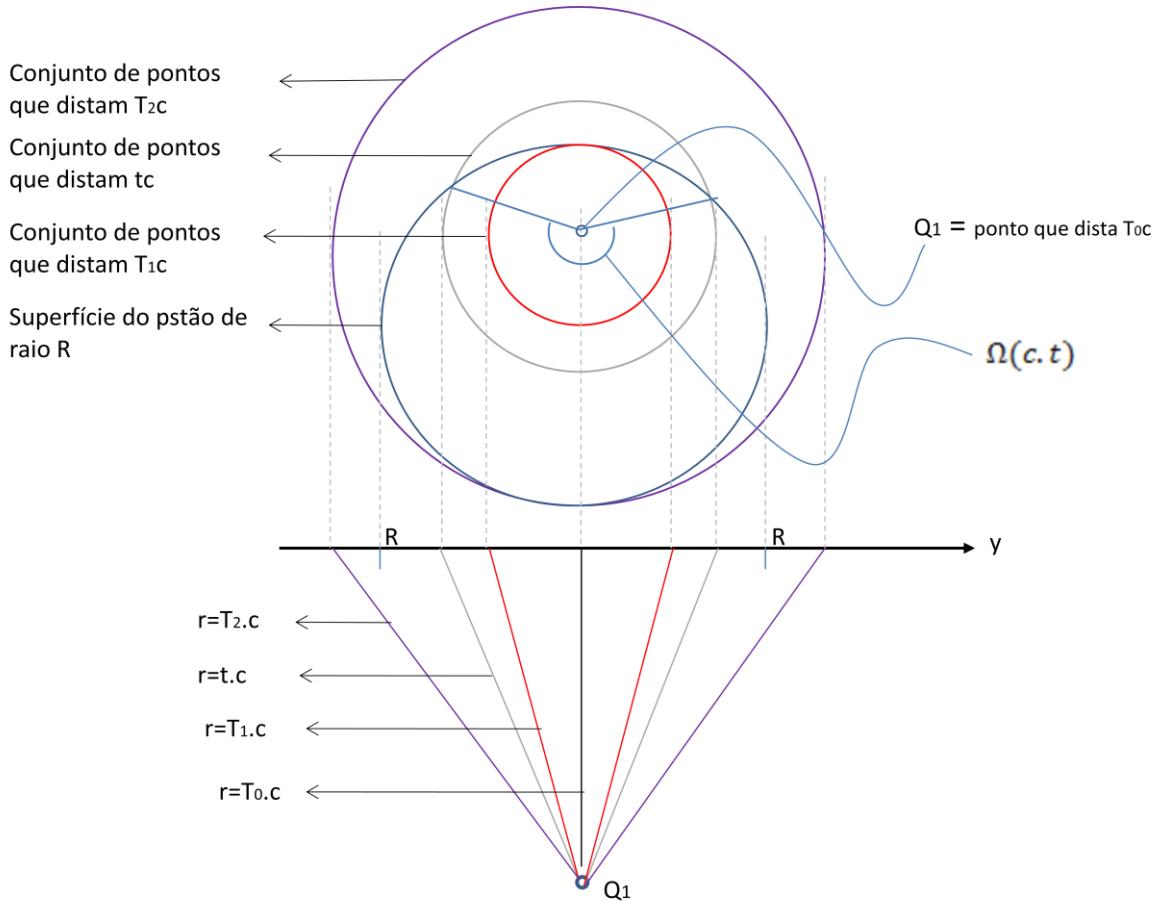


**Figura 13.**



**Figura 13 - Esquema para explicação do método de resolução proposto por Weight.**

Para a simplificação do cálculo da integral pela equação 3.26, foram criadas três faixas de posicionamento do ponto Q e três intervalos de tempo. As três situações nas quais o ponto de observação pode se encontrar são com sua projeção dentro da superfície do pistão, como exemplificado na



**Figura 13**, com sua projeção sobre a borda do pistão e com a projeção do ponto fora da superfície do pistão. As três situações com relação ao tempo da emissão da onda mecânica são nos instantes de tempo  $t < t_0$  e  $t > t_2$  quando o ponto observado não sofre influência de nenhum ponto da superfície do pistão, ou seja, a pressão nestes instantes de tempo será considerada zero, na faixa de tempo  $t_0 \leq t \leq t_1$  e na faixa de tempo  $t_1 < t \leq t_2$ , sendo estes dois últimos criados para simplificar o cálculo do ângulo  $\Omega(c, t)$ .

A seguir encontra-se os valores de  $\Omega(c, t)$  nas diversas situações mencionadas acima, resumido na **Tabela 1**.

**Tabela 1 – Valores de Omega nos intervalos da posição geométrica e nos intervalos de tempo.**

Região	Intervalo de tempo	$\Omega(c, t)$
Dentro da superfície	$t_0 < t < t_1$	$2\pi$
	$t_1 < t < t_2$	$2 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{c^2 \cdot t^2 - x^2 + y^2 - R^2}{2y(c^2 \cdot t^2 - x^2)^{0.5}} \right)$

Na borda	$t_0=t=t_1$	$\pi$
	$t_1 < t < t_2$	$2 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{(c^2 \cdot t^2 - x^2)^{0.5}}{2R} \right)$
Fora da superfície	$t_0 < t < t_1$	0
	$t_1 < t < t_2$	$2 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{c^2 \cdot t^2 - x^2 + y^2 - R^2}{2y(c^2 \cdot t^2 - x^2)^{0.5}} \right)$
Onde, $t_0 = x/c$ ; $t_1 = (1/c)[(R-y)^2 + x^2]^{0.5}$ ; $t_2 = (1/c)[(R+y)^2 + x^2]^{0.5}$		

O modelo desenvolvido até o momento não considera a velocidade não uniforme da membrana. Para isso se faz necessário uma aproximação da velocidade dos pontos da membrana para uma velocidade média que será considerada no modelo do pistão plano.

Assim, obtendo a equação da linha elástica da membrana em função do raio (como será apresentada na modelagem da membrana) e integrando-a ao longo do raio e dividindo pelo mesmo, obtém-se a amplitude média dos deslocamentos de todos os pontos da membrana e uma vez conhecida a freqüência de vibração da membrana será utilizada uma oscilação senoidal. Portanto, tem-se:

$$\vec{v}_n(t) = \frac{\int_0^R \left( \frac{q \cdot a^4}{64D} - \frac{q \cdot r^4}{64D} + \frac{M_c \cdot r^2}{2D(1+v^2)} \right) dr}{R} \cdot \text{sen}(wt) \quad (3.27)$$

Este modelo também não prevê as perdas no meio devido a relaxação, viscosidade e outros efeitos como citados na revisão bibliográfica, portanto, foi sugerido a multiplicação da pressão final pelo fator  $e^{-\alpha \cdot tc}$ , onde  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação,  $t$  é o tempo e  $c$  é a velocidade de propagação no meio. O valor de  $\alpha$  será o mencionado na revisão e este foi obtido para freqüências acima de 10khz e ar seco.

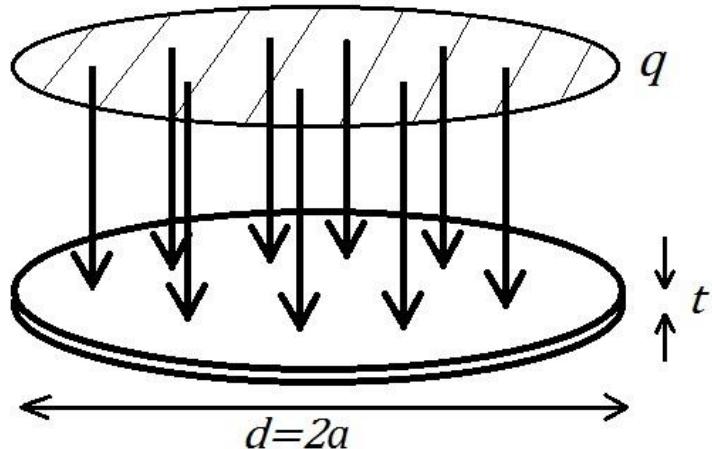
Essas aproximações farão com que a solução não seja exata para a membrana, portanto será feita uma análise dos erros obtidos com relação ao obtido pelo método de elementos finitos para validação do modelo.

### 3.2. Modelagem das Estruturas em Forma de Membrana

A modelagem da membrana requer grande atenção por ser a parte móvel do CMUT e também a interface deste com o meio. Primeiramente será realizado um estudo analítico da membrana, e posteriormente, este estudo será verificado e servirá de base para realizar simulações mais eficientes e mais bem compreendidas.

Aqui, por enquanto, serão examinados modelos bastante simplificados da membrana, a fim de se fazer a conferencia entre os modelos computacionais e analíticos e de obter margens dimensionais de trabalho.

Primeiramente, será feita uma análise analítica de como a membrana se deforma quando é aplicada sobre ela uma carga uniforme  $q$ , em toda a superfície de uma de suas faces, como é mostrado na **Figura 14**.

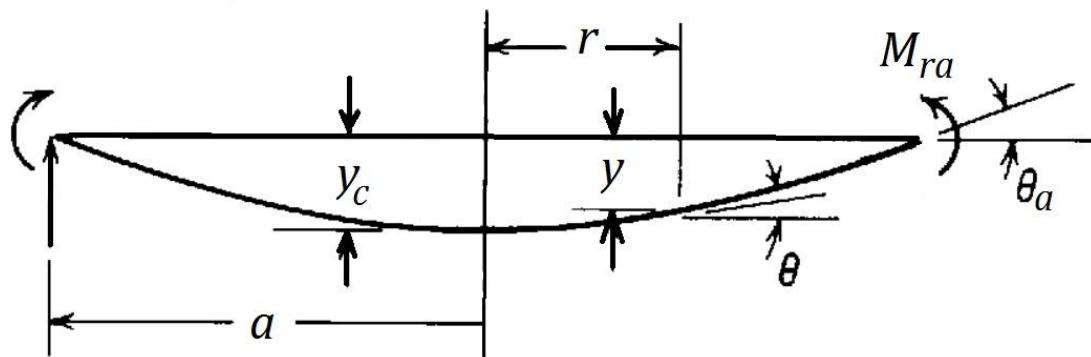


**Figura 14 - Ilustração da carga distribuída devido à pressão atmosférica aplicada sobre uma membrana circular de raio  $a$  e espessura  $t$ .**

É considerada a membrana com as dimensões da **Figura 14**, onde  $d$  é seu diâmetro e  $t$  sua espessura. O material da membrana tem o módulo de elasticidade  $E$  e coeficiente de Poisson  $\nu$ . Os cálculos serão realizados conforme Young e Budynas [11]. Para isso, o problema é simplificado assumindo as seguintes hipóteses para a membrana:

- É plana;

- Tem espessura uniforme;
- O material é homogêneo;
- O material é isotrópico;
- A espessura é menor que cerca de um quarto da menor dimensão lateral (nesse caso o próprio diâmetro);
- A deflexão máxima é menor que aproximadamente a metade da espessura;
- Todas as forças, cargas e reações são normais à superfície da membrana;
- A membrana, em qualquer posição, não é tensionada além de seu limite elástico;
- A membrana está engastada ao longo de toda a sua borda.



**Figura 15 - Esquema da membrana deformada para a modelagem estática com as dimensões mais relevantes para o problema.**

Por conveniência o trabalho será realizado com a membrana posicionada horizontalmente, conforme a **Figura 15**.

Obedecidas todas essas hipóteses, e adotando um sistema de coordenadas radial com origem no centro da membrana não deformada, e aplicando-se uma carga  $q$  uniforme, as seguintes equações podem ser escritas:

Rigidez de flexão da membrana:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.28)$$

Deflexão central (onde a deflexão é máxima):

$$y_c = -\frac{qa^4}{64D} \quad (3.29)$$

Momento fletor central:

$$M_c = \frac{qa^2(1+\nu)}{16} \quad (3.30)$$

Momento fletor na borda na direção radial (valor máximo):

$$M_{ra} = -\frac{qa^2}{8} \quad (3.31)$$

Deflexão, momento fletor (na direção radial), e inclinação em função de  $r$ :

$$y(r) = y_c + \frac{M_c r^2}{2D(1+\nu^2)} - \frac{qr^4}{64D} \quad (3.32)$$

$$M(r) = M_c - \frac{qr^2(3+\nu)}{16} \quad (3.33)$$

$$\theta(r) = \frac{M_c r}{D(1+\nu)} - \frac{qr^3}{16D} \quad (3.34)$$

Com posse das equações 3.28 a 3.34 já é possível estudar o comportamento da membrana para um carregamento constante.

A partir da equação 3.31, que calcula o momento fletor máximo na membrana carregada, é possível avaliar se o material não é carregado além de sua capacidade. Com o valor do momento fletor máximo é possível calcular a máxima tensão normal aplicada sobre ele pela relação:

$$\sigma_{max} = \frac{6M_{max}}{t^2} \quad (3.35)$$

Calculando a tensão normal máxima sofrida pelo material, compara-se este valor à tensão de ruptura do material considerado.

## 4. Fabricação do protótipo

Neste tópico será apresentado o planejamento da microfabricação, as máquinas utilizadas durante o processo, as substâncias e as dimensões do protótipo. A intenção é de se construir o protótipo no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS).

O LNLS é uma instituição aberta, multidisciplinar e multiusuários, vinculado ao Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) e operado pela Associação Brasileira de Tecnologia de Luz Síncrotron (ABTLus) por meio de contrato de gestão com o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT).

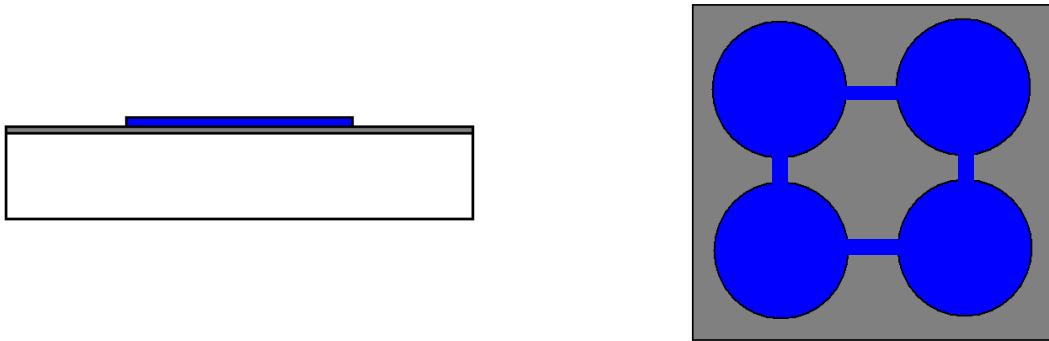
### 4.1. Plano de fabricação

O plano de fabricação será explicitado através dos métodos mencionados no item 2.5. A fabricação proposta pelo professor orientador deste trabalho conta com a técnica de Bonding, explicada no item 2.5.4, para facilitar o processo de fabricação, permitindo a redução do número de passos para se obter o CMUT.

O processo consiste de duas etapas principais, a primeira na qual é produzida a base que consiste do eletrodo inferior e a parte da estrutura que sustenta a membrana e a segunda na qual é produzida a membrana com o eletrodo superior.

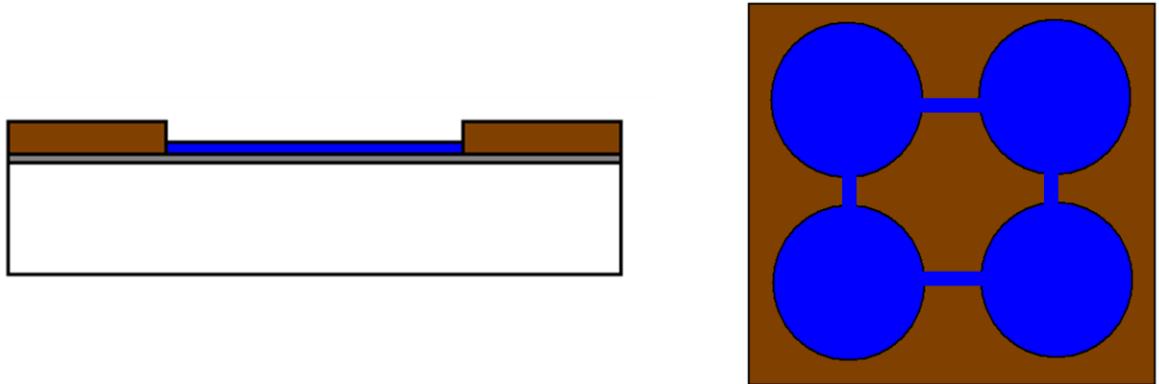
A primeira etapa se inicia com a deposição de um isolante no wafer de silício e através da técnica de spin-coating obtém-se uma camada de espessura desejada (camada cinza da **Figura 16**), controlando a velocidade e o tempo do spin-coating.

O próximo passo é obter os eletrodos inferiores e os trilhos pelos quais eles serão interligados (estrutura azul da **Figura 16**). Para a deposição do metal realiza-se uma técnica de evaporação cobrindo toda a superfície, que é capaz de obter camadas finas na espessura de centenas de angstrons, o suficiente para permitir a condução elétrica necessária para o funcionamento do CMUT. Depois realiza-se uma litografia para depositar o resisto no formato dos eletrodos e trilhos para em seguida aplicar a corrosão para a remoção do restante do metal desprotegido. Após a remoção do resisto residual obtém-se a configuração como apresentada pela **Figura 16(b)**.



**Figura 16 - (a) Perfil lateral da camada isolante e eletrodo inferior. (b) Perfil superior da camada isolante e eletrodo inferior.**

Após esta etapa é necessário fabricar a estrutura de SU-8 que dará suporte à membrana e o eletrodo superior. Para isso é realizado o processo de litografia. Como o SU-8 é um fotoresiste positivo, deve-se apenas depositar o SU-8 sobre toda a superfície da primeira metade, colocar a máscara no formato da região azul da **Figura 16(b)** e expor o SU-8 (não coberto pela máscara) à luz branca. A parte exposta ficará enrijecida, permitindo que o restante possa ser removido sem maiores problemas, assim tem-se a estrutura inferior como demonstrada na **Figura 17**.



**Figura 17 - (a) Perfil lateral da estrutura e eletrodo inferior. (b) Perfil superior da estrutura e eletrodo inferior.**

Para se fabricar a segunda metade é necessário depositar algum material de sacrifício sobre o substrato e, em seguida, a deposição de SU-8, ambos processos utilizando-se o spin-coating, o primeiro (material de sacrifício) não é necessário um controle da espessura pois este será removido ao final da fabricação do CMUT porém o segundo (SU-8) deve-se ajustar a velocidade e o tempo necessários para se obter a espessura desejada. Após a secagem da parte da segunda metade do CMUT que

constitui a membrana do CMU, é realizado uma evaporação do metal para a formação do eletrodo superior, obtendo-se a configuração apresentada na **Figura 18**.



**Figura 18 - Perfil da metade de cima do CMUT, membrana e eletrodo superior.**

A penúltima etapa é realizar o bonding aplicando-se uma pressão sobre as duas partes sobrepostas e elevando a temperatura para acelerar a colagem. Porém o SU-8 após passar pela secagem não gruda facilmente com outra superfície feita de SU-8, assim serão testadas algumas formas de facilitar essa colagem, como por exemplo ativar as duas superfícies por plasma. Outra opção é colocar o eletrodo inferior entre as partes de SU-8. Assim, espera-se obter uma das configurações apresentadas na **Figura 19(a)** ou **Figura 19(b)** após o bonding e a remoção do material de sacrifício.

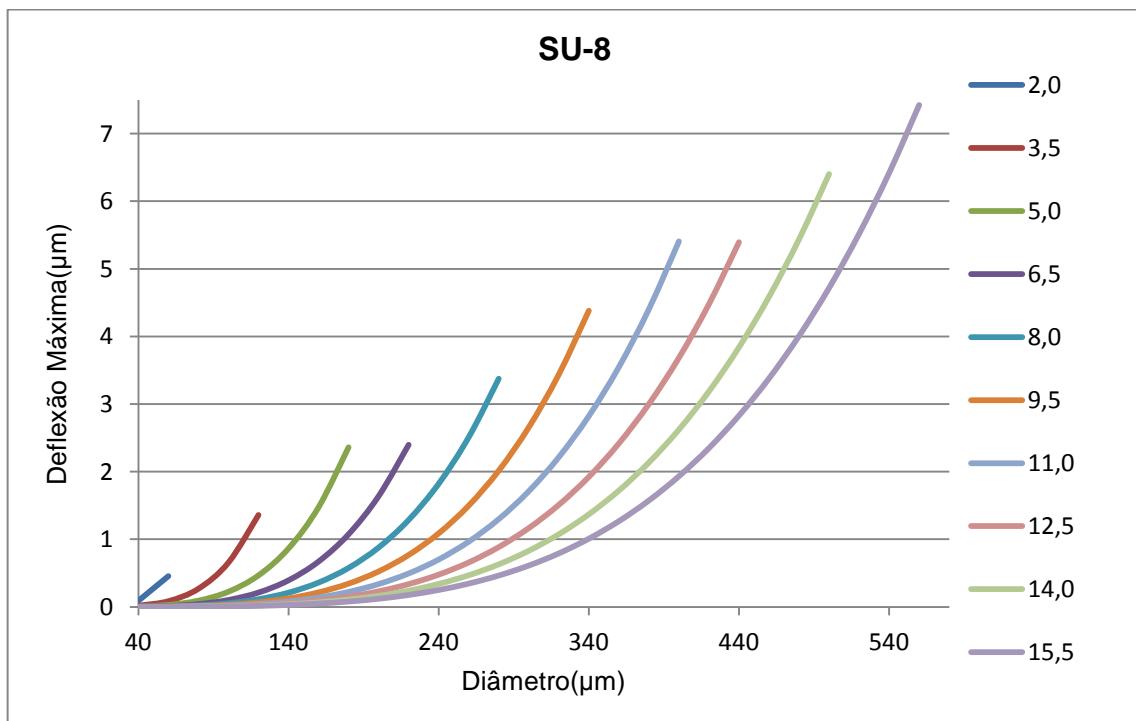


**Figura 19 - (a) Perfil do CMUT com o bonding entre duas superfícies de SU-8. (b) Perfil do CMUT com o bonding entre a estrutura inferior de SU-8 e o eletrodo superior.**

## 5. Resultados

### 5.1. Modelagens

Com a finalidade de avaliar as combinações de diâmetros e espessuras de membranas para quais esses cálculos são válidos, dentro dos limites das validades de suas hipóteses, a construção de um gráfico de deflexão máxima (equação 3.29) para uma faixa de diâmetros e espessuras é um bom método inicial para verificar quais dessas combinações são boas para se trabalhar. Isso é feito no gráfico 1 com uma carga atmosférica ( $q=101,325\text{KPa}$ ) para uma membrana do material SU-8 foto-resiste (material polimérico usualmente utilizado na confecção de microdispositivos) com tais propriedades:  $E=4,02\text{GPa}$ ,  $\nu=0,22$ . [12][13]



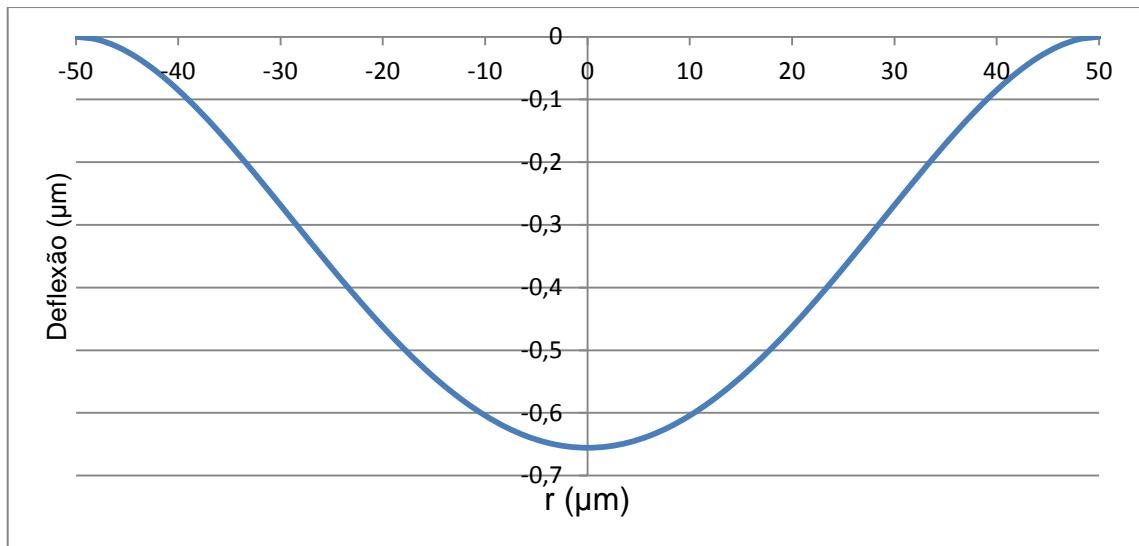
**Figura 20 - Deflexão máxima ocorrida no centro da membrana de SU-8 em função do diâmetro e da espessura.**

As faixas de valores avaliados foram escolhidos desta maneira por serem valores que se situam perto dos limites mínimos de dimensões que se conseguem fabricar com os equipamentos disponíveis.

Com uma breve análise do gráfico é possível notar que as curvas estão bem coerentes com o que era esperado. Para uma dada espessura, um aumento no

diâmetro resulta em um aumento na deflexão. Já para um dado diâmetro, um aumento na espessura resulta em uma diminuição da deflexão na membrana. Isso é observado no gráfico. É importante também observar que as curvas deixam de ser traçadas a partir de certo ponto. Isso acontece porque a partir desse ponto a hipótese 6 deixa de ser respeitada, invalidando os resultados que seriam obtidos por esses métodos a partir desse ponto.

Com a equação 3.32 é possível plotar o perfil de como a membrana se deformará com a pressão atmosférica. Para isso é considerada a mesma membrana com o diâmetro de 100  $\mu\text{m}$  e espessura de 3,5  $\mu\text{m}$ , valores comportados na **Figura 21**:

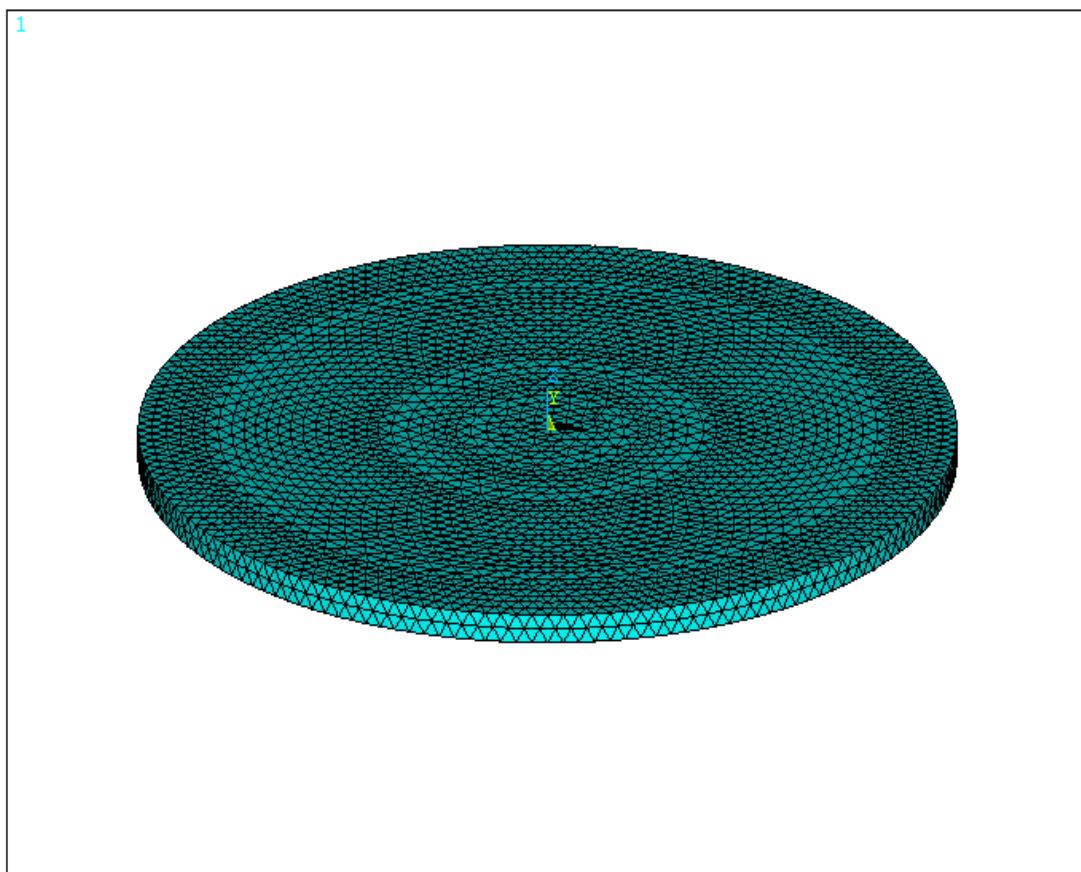


**Figura 21 - Perfil da membrana de SU-8 de diâmetro 100 $\mu\text{m}$  e espessura de 3,5 $\mu\text{m}$  sob carregamento atmosférico.**

O perfil se mostra condizente com o resultado atingido na **Figura 20** e o seu formato é coerente com o esperado.

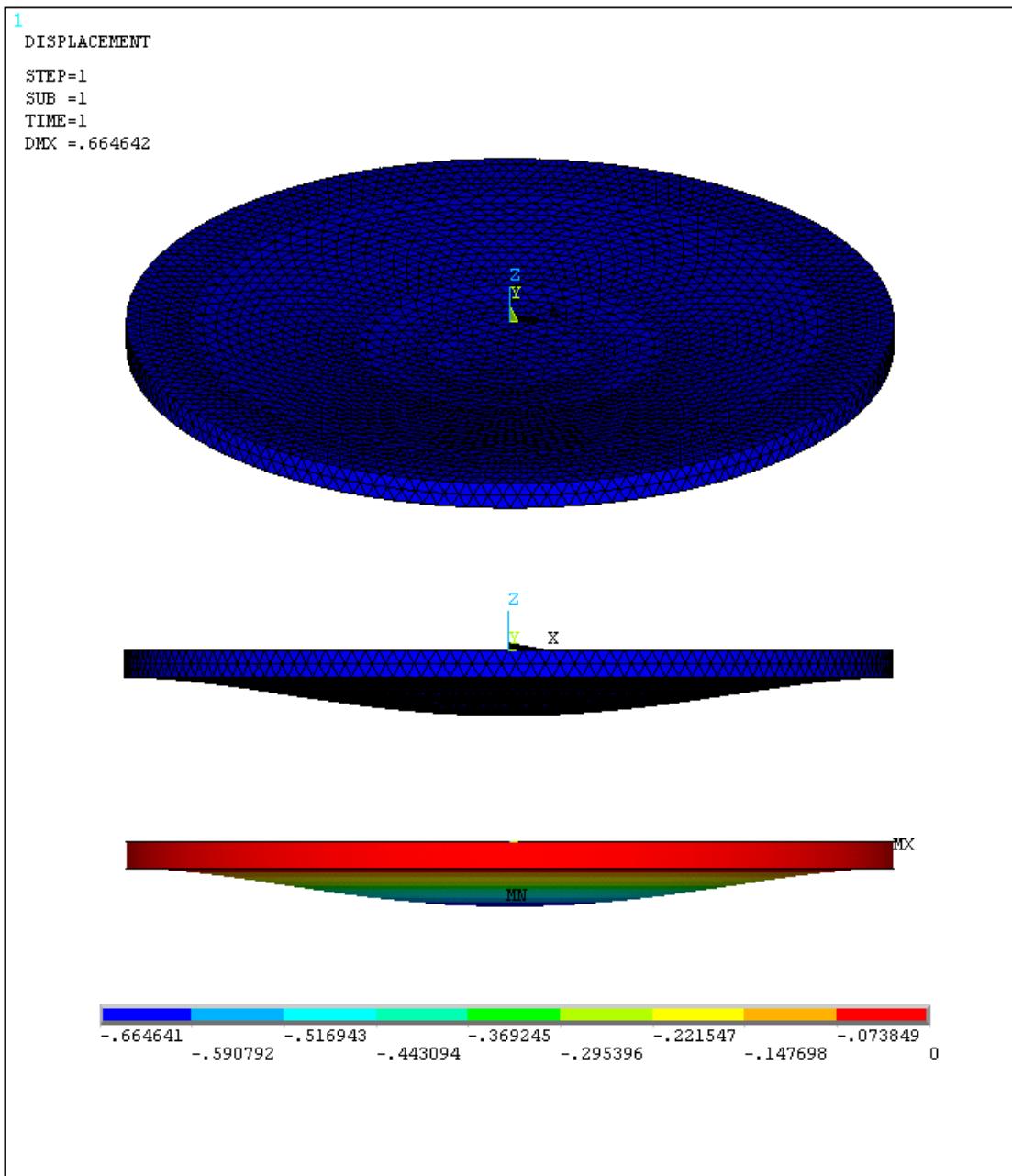
Em posse desses resultados, temos boas combinações de diâmetros e espessuras de membranas para a construção de um modelo computacional preliminar, pois assim, o tempo gasto com simulações desnecessárias é drasticamente diminuído. De qualquer modo, a construção de um modelo computacional próximo ao modelo analítico é necessário para a correta avaliação dos resultados e detecção de erros entre as modelagens. Por isso, é importante ressaltar que esse primeiro modelo apresentado a seguir não é o modelo do CMUT, mas sim o modelo de uma membrana sob as mesmas condições (geometria, material e restrições de movimento) do modelo analítico.

O modelo computacional é construído no software comercial de elementos finitos ANSYS. A membrana é modelada tridimensionalmente, o que garante uma boa precisão nos resultados, porém requer um custo computacional bastante elevado. É construído um cilindro de 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 3,5  $\mu\text{m}$  de espessura, e em seguida o cilindro é discretizado em elementos SOLID92 (próprio da biblioteca do software, que é estrutural, tem forma tetraédrica com 10 nós, e possui graus de liberdade de deslocamento nas três direções em cada nó). Após a discretização, os movimentos dos nós da borda são restringidos nas três direções e pressão atmosférica é aplicada na face superior.



**Figura 22 – Membrana discretizada.**

Após a solução estática, a estrutura deformada é representada através da **Figura 23**.



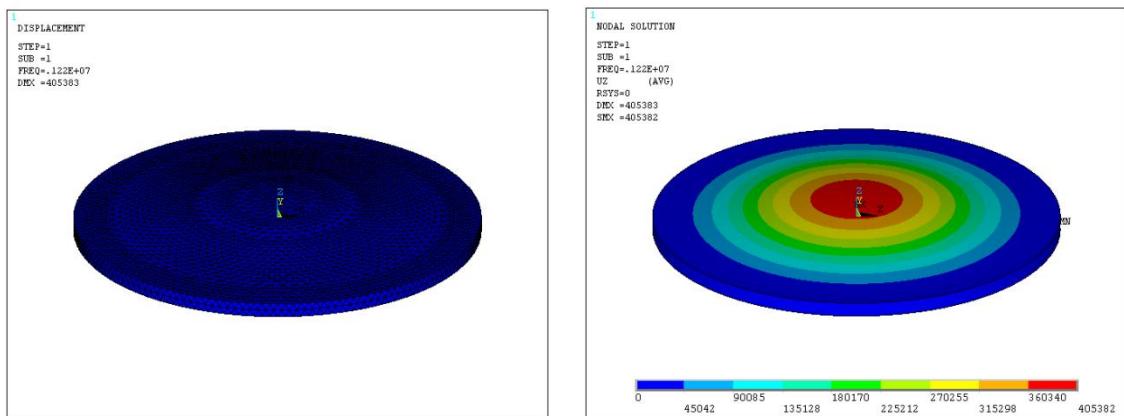
**Figura 23 – Membrana deformada.**

Com isso, conclui-se que o perfil da membrana deformada acima é semelhante ao perfil calculado analiticamente, da **Figura 21**. Também observamos que a deflexão máxima obtida na simulação, 0,664642  $\mu\text{m}$ , está bem próxima do calculado, que é de 0,655575  $\mu\text{m}$ . Os valores não tem como ser iguais pois o modelo analítico é uma aproximação e o modelo computacional possui erros sistemáticos, como discretização limitada, erros de aproximação e de truncamento, etc., mas mesmo assim podemos garantir que os resultados obtidos computacionalmente estão mais próximos da realidade pois as aproximações do modelo analítico gera erros maiores.

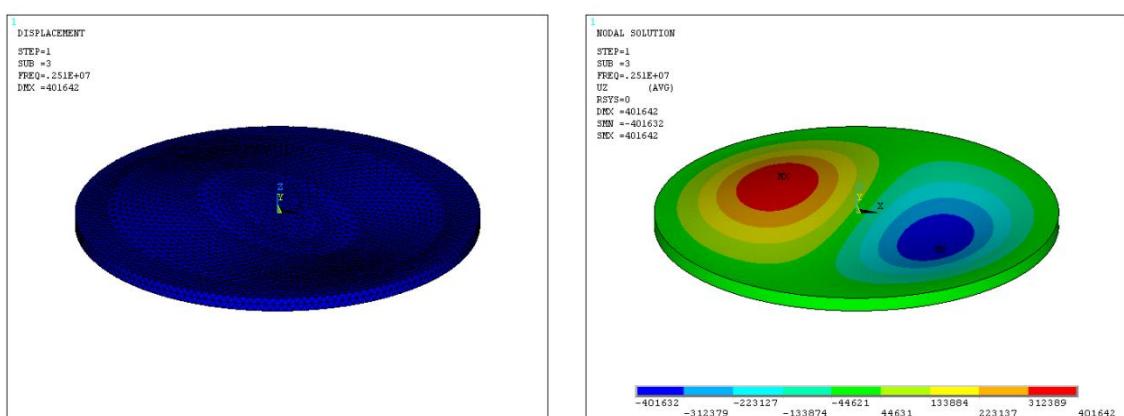
Agora que foi demonstrado que as duas modelagens tem resultados muito próximos, o uso do modelo computacional poderá ser estendido para outros tipos de solução, já que gera resultados melhores e as soluções analíticas são muito complicadas de serem obtidas.

### 5.1.1. Análise modal

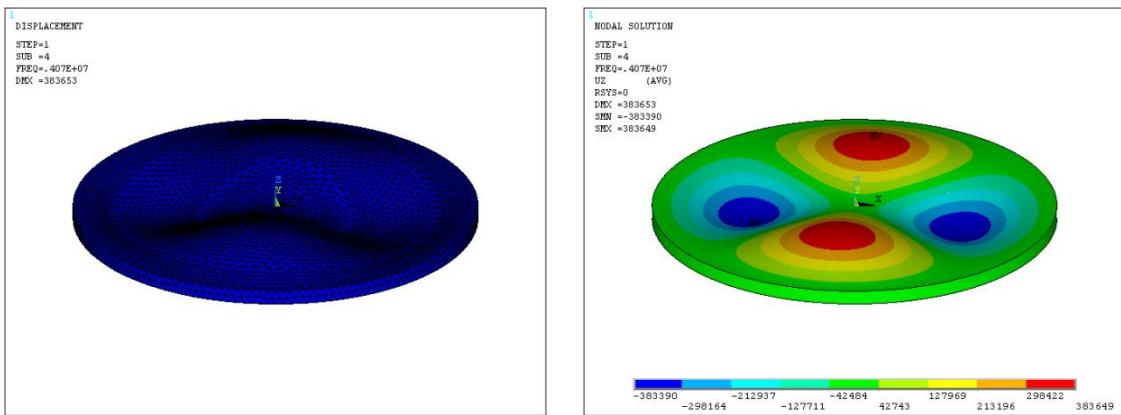
Com o mesmo modelo utilizado anteriormente na análise estática, é obtida a solução modal do sistema, e assim é possível encontrarmos quantos modos de vibrar forem desejados. A solução é feita pelo método Block Lanczos e os efeitos de amortecimento do material são desprezados. A seguir (ver **Figura 24**, **Figura 25** e **Figura 26**) são ilustrados o primeiro, segundo, e terceiro modos de vibrar obtidos da membrana e suas respectivas freqüências:



**Figura 24 – Primeiro modo de vibrar da membrana a 1,22 MHz.**



**Figura 25 - Segundo modo de vibrar da membrana a 2,51 MHz.**

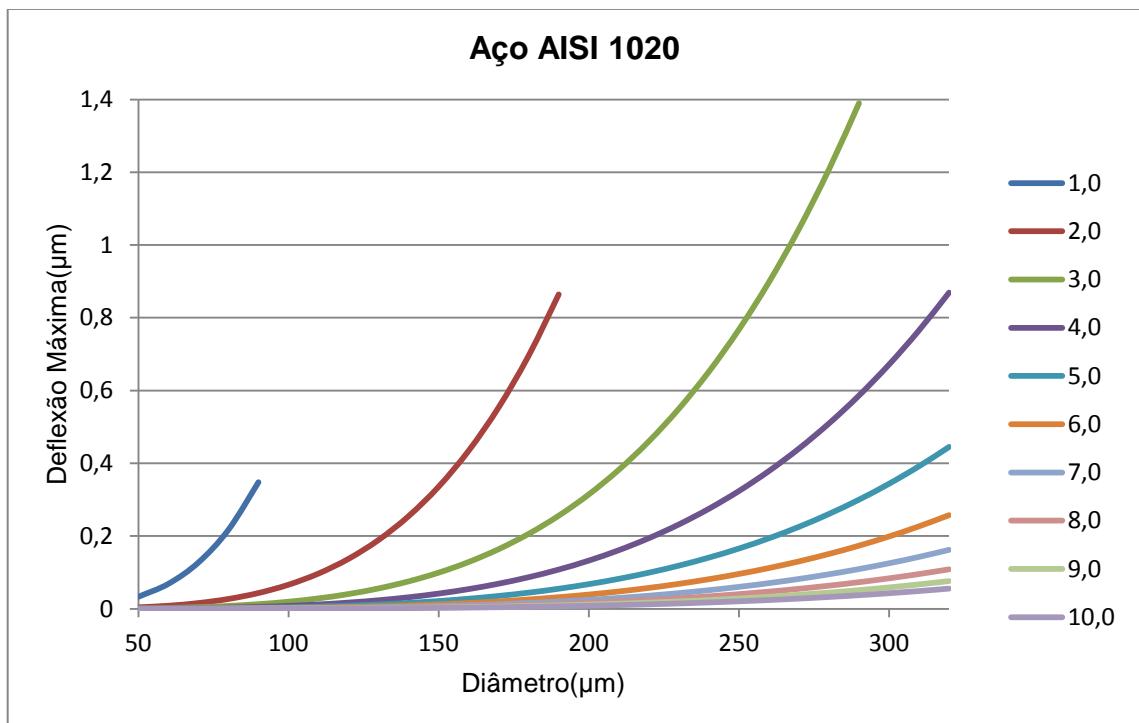


**Figura 26 - Terceiro modo de vibrar da membrana a 4,07 MHz.**

### 5.1.2. Seleção de materiais

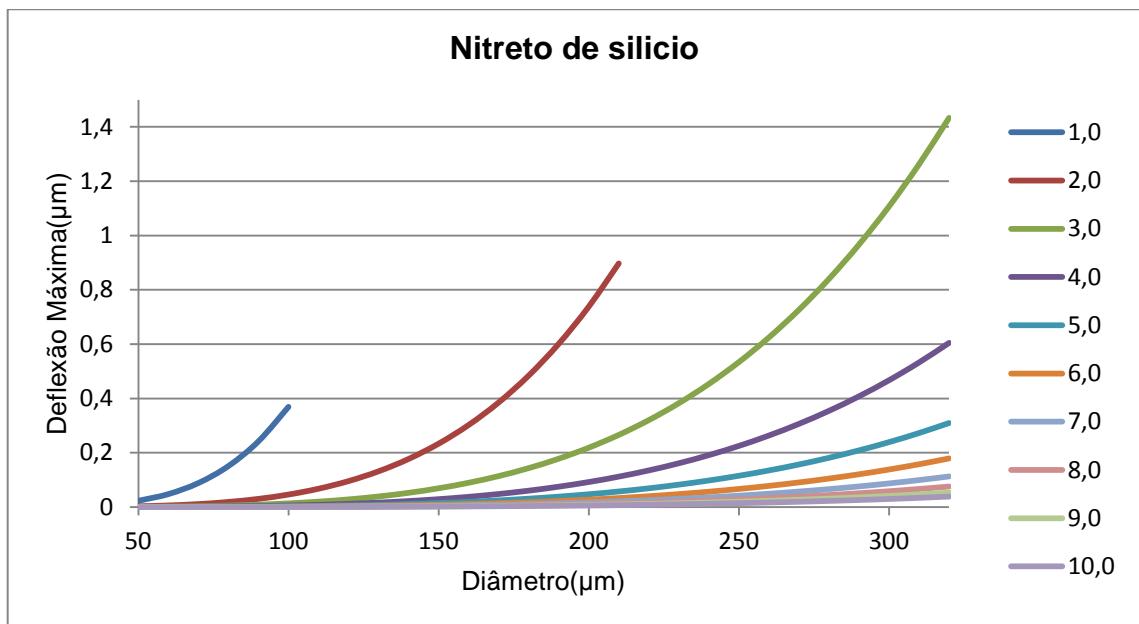
Um breve estudo de materiais pode ser realizado de forma análoga ao tópico 3.2.1, plotando o gráfico da deflexão máxima (equação 3.29) para diferentes materiais. Nesse caso foram analisados, além do polímero SU-8, já analisado anteriormente, um metal e uma cerâmica, por serem materiais de propriedades mecânicas bem diferentes.

O metal considerado foi o aço AISI 1020, com  $E=205\text{GPa}$  e  $\nu=0,29$  [14]



**Figura 27 - Deflexão máxima na membrana de Aço AISI 1020 em função do diâmetro e da espessura.**

A cerâmica utilizada foi o Nitreto de Silício, material bastante utilizado em microdispositivos e com  $E=300\text{GPa}$  e  $\nu=0,26$  [15]



**Figura 28 - Deflexão máxima na membrana de Nitreto de Silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) em função do diâmetro e da espessura.**

Observa-se para esses dois materiais uma deflexão muito menor em comparação ao polímero, o que era esperado devido as suas elevadas rigidez mecânica.

## 5.2. Simulações

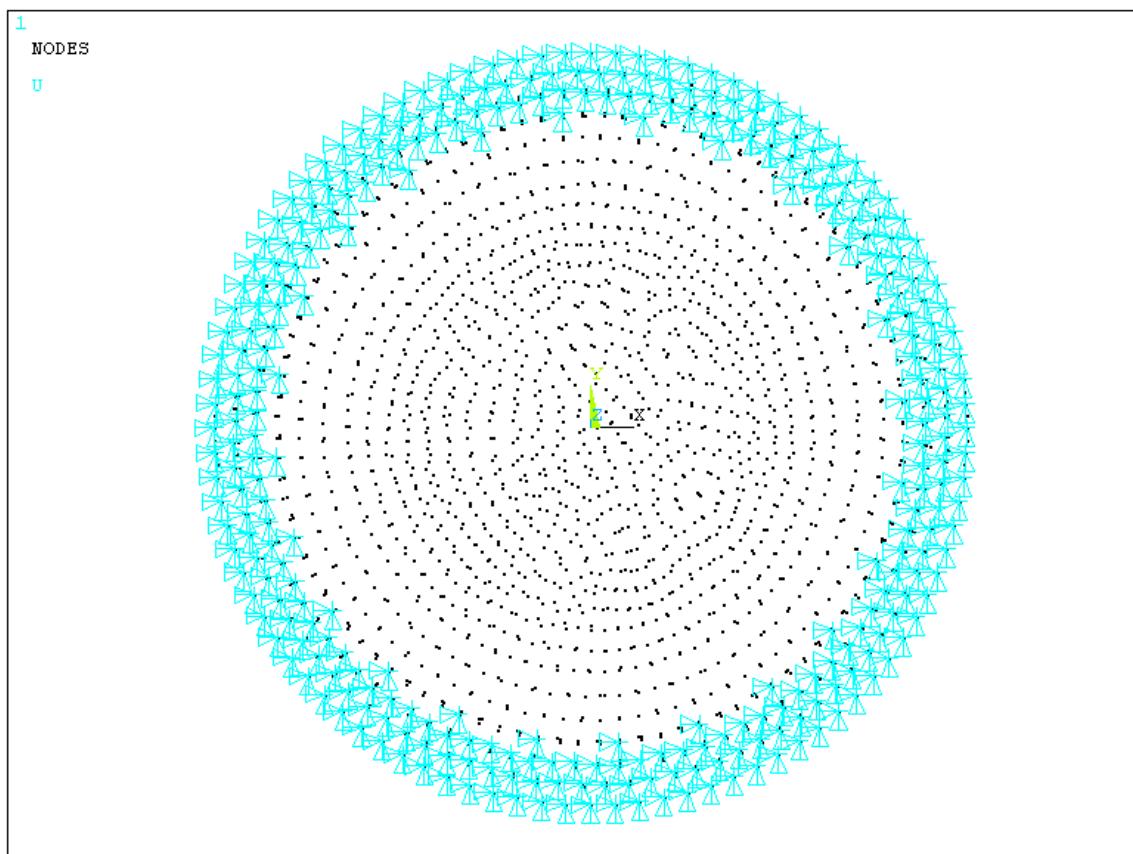
No item 3.2 foram apresentadas algumas simulações com o intuito de estudar apenas o comportamento da membrana isolada. Aqui iremos fazer simulações considerando não apenas a membrana isolada, mas um modelo do CMUT mais próximo da realidade, levando em consideração fenômenos de diferentes naturezas físicas como forças eletrostáticas e o ultra-som.

É importante ressaltar que na atualidade, os softwares de simulações em elementos finitos comerciais estão bem desenvolvidos no que se refere a simulações

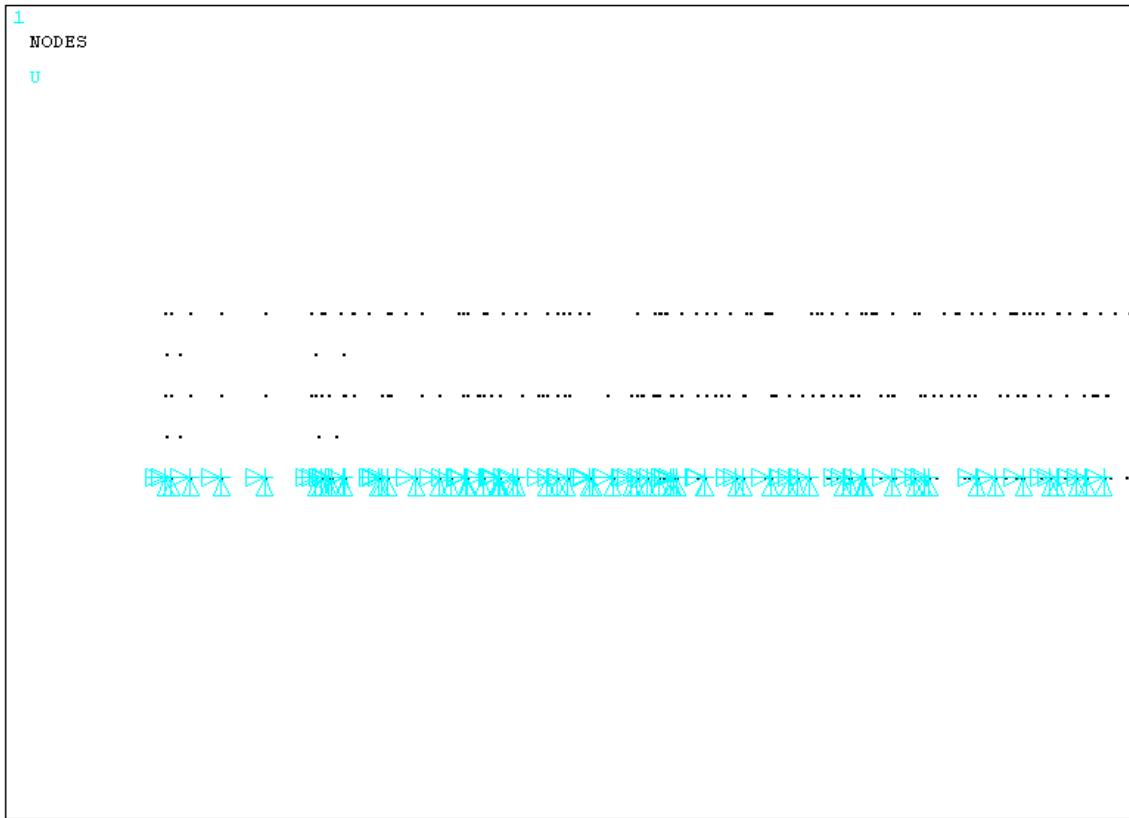
estruturais, porém não tanto com simulações de diferentes naturezas físicas, o que torna esse trabalho muito complicado e gera resultados que podem não ser tão próximos da realidade quanto se espera.

### 5.2.1. **Simulação da membrana**

A modelagem da membrana agora é realizada de forma mais fiel à realidade. Recordando que no item 3.2. os movimentos da membrana foram restritos pelos nós da borda, é possível obter um cenário mais realista se restringirmos apenas os nós do contato entre a membrana e seu suporte (superfície anelar na face inferior), como é ilustrado na **Figura 29** (vista superior) e **Figura 30** (vista lateral).



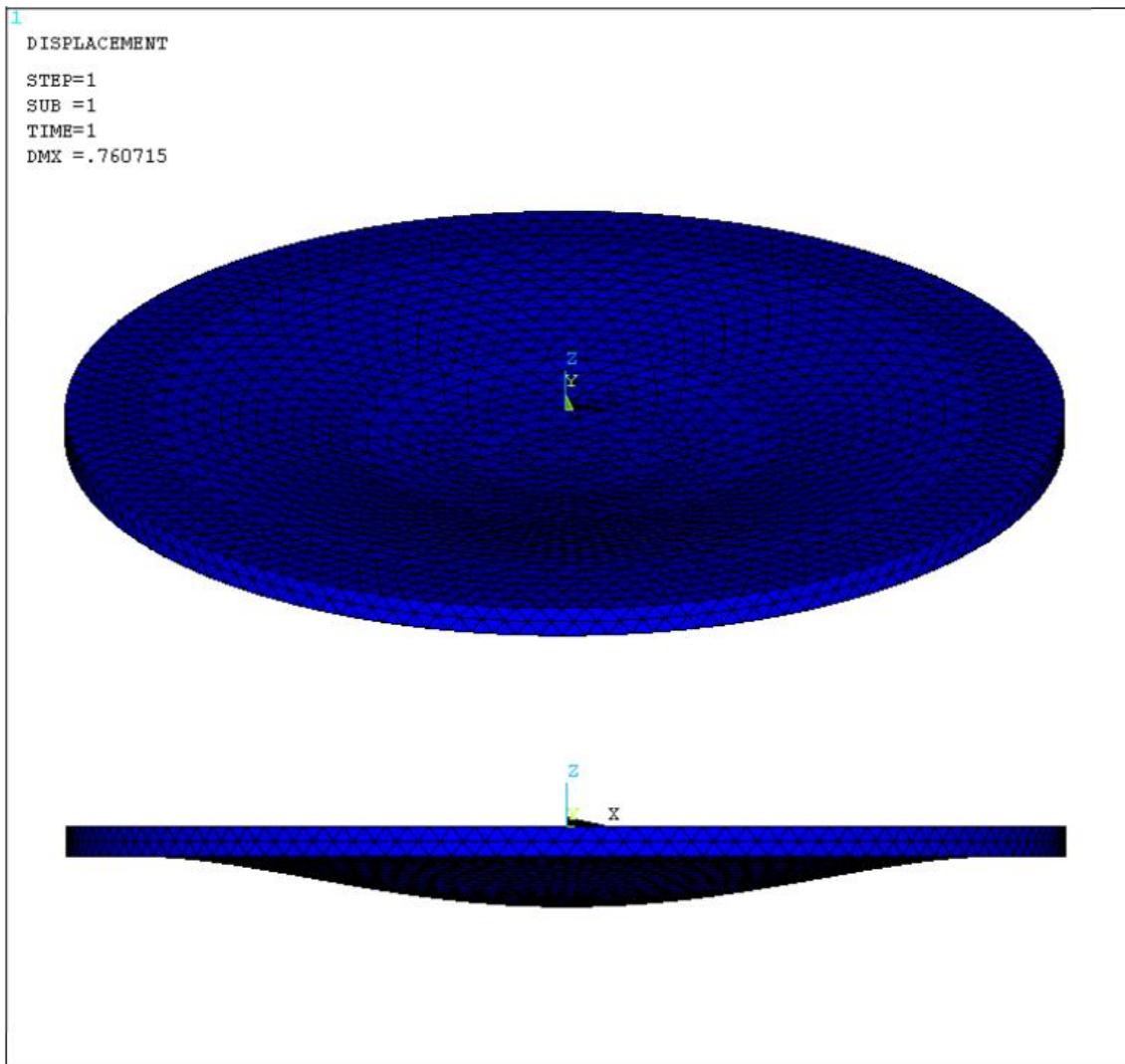
**Figura 29 – Restrições de movimento nos nós (vista superior).**



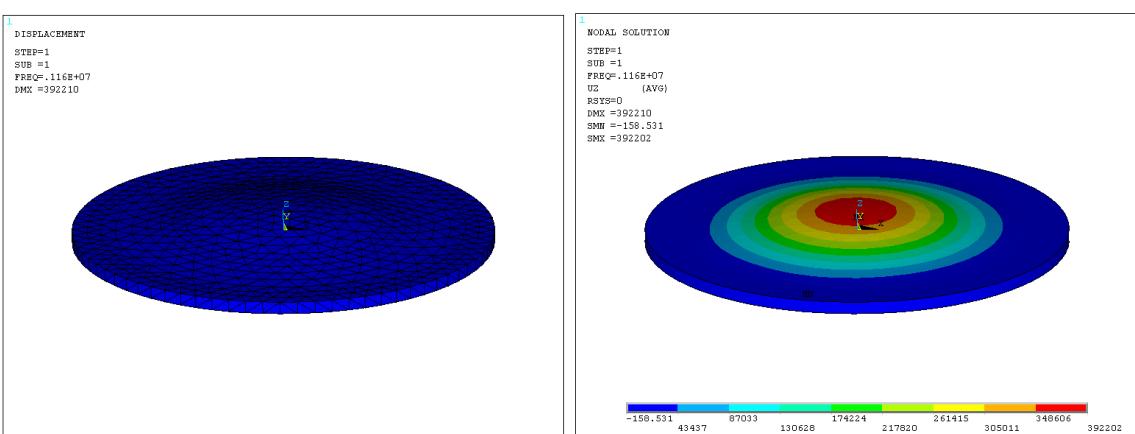
**Figura 30 - Restrições de movimento nos nós (vista frontal).**

As restrições de movimento nesses nós tornam o modelo mais realista, pois também é considerada a deformação por tração na superfície superior do CMUT como um todo, e não apenas na superfície superior da membrana, o que faz com que a deflexão máxima da membrana também aumente por consequência.

Para prosseguirmos com as simulações nas mesmas dimensões, material, e pressão atmosférica do item 3.2., temos agora que considerar um diâmetro maior, sendo que ao diâmetro da membrana (parte que vibra) é acrescido o comprimento referente ao suporte da cavidade (aumento de 20% do diâmetro, mas diâmetro livre é mantido em 100  $\mu\text{m}$ ). Assim, temos os seguintes resultados:



**Figura 31 - Membrana deformada.**



**Figura 32 - Primeiro modo de vibrar a 1,16 MHz.**

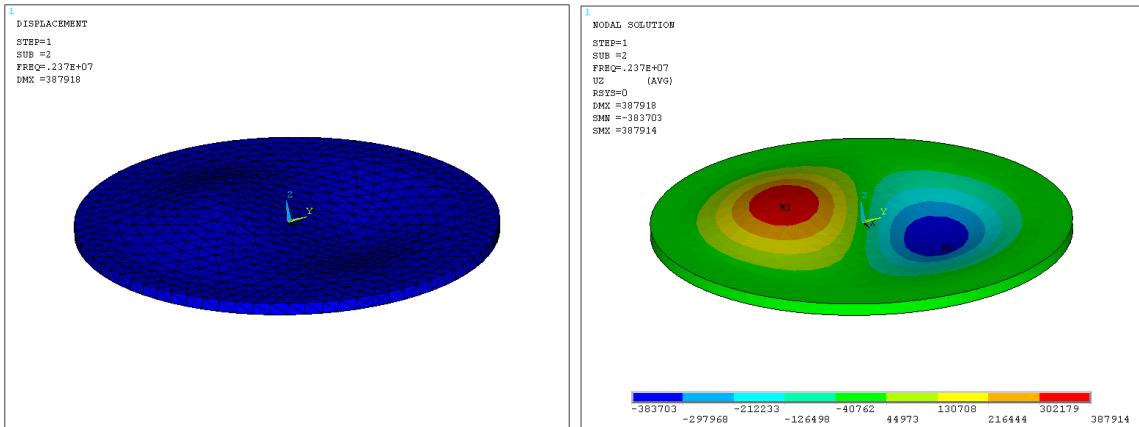


Figura 33 - Segundo modo de vibrar a 2,37 MHz.

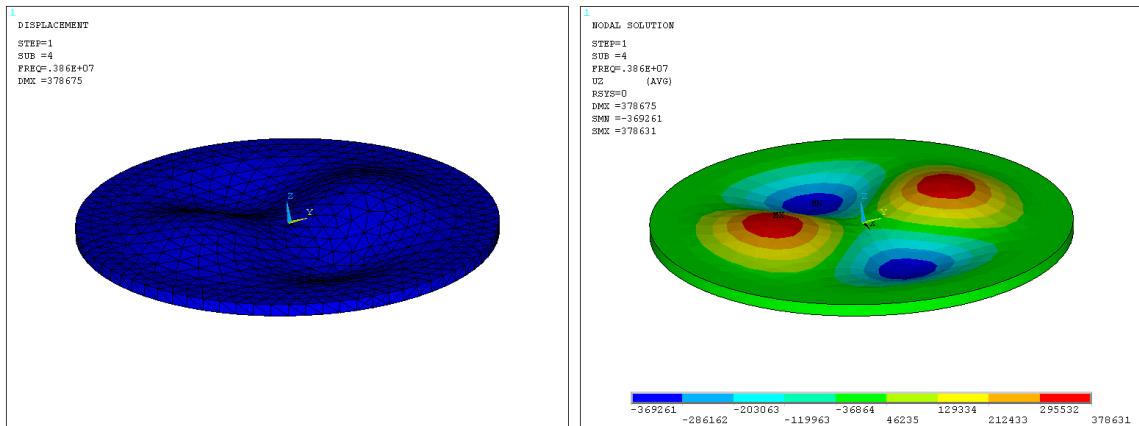


Figura 34 - Terceiro modo de vibrar a 3,86 MHz.

Pode-se observar que os resultados das novas simulações são diferentes, mas bem próximos aos resultados anteriores, o que é coerente.

### 5.2.2. *Interações Eletromecânicas*

Para reproduzir no ANSYS as forças elétricas envolvidas na membrana é utilizado o elemento TRANS126 da biblioteca do software. Para trabalhar com este elemento devemos criar novos nós, relativos ao eletrodo inferior (solidário ao substrato, e portanto, ancorado), simétricos em relação aos nós do eletrodo superior (superfície inferior da membrana). O elemento possui estes dois nós. O diâmetro do eletrodo é construído com 80% do valor do diâmetro da cavidade. Após a criação de todos os elementos TRANS126 temos a seguinte configuração:

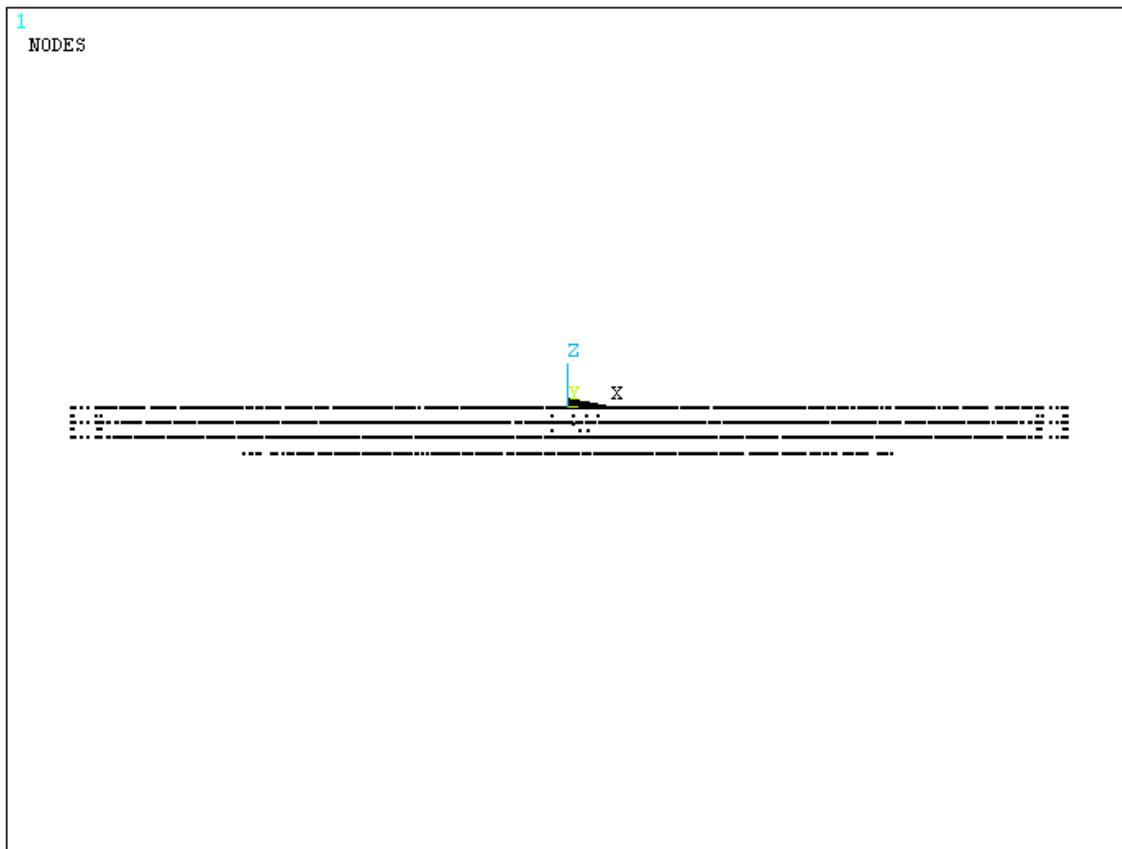


Figura 35 - Nós da membrana e elementos TRANS126 (inferiores).

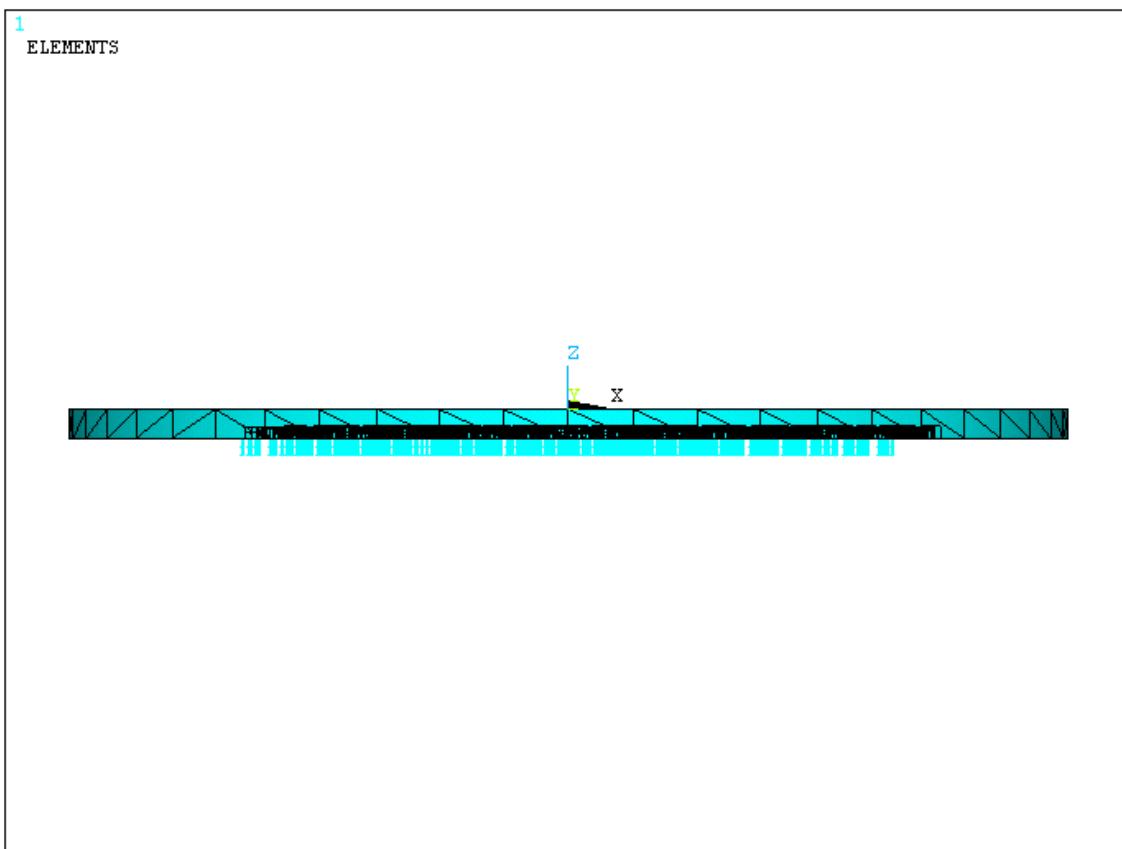
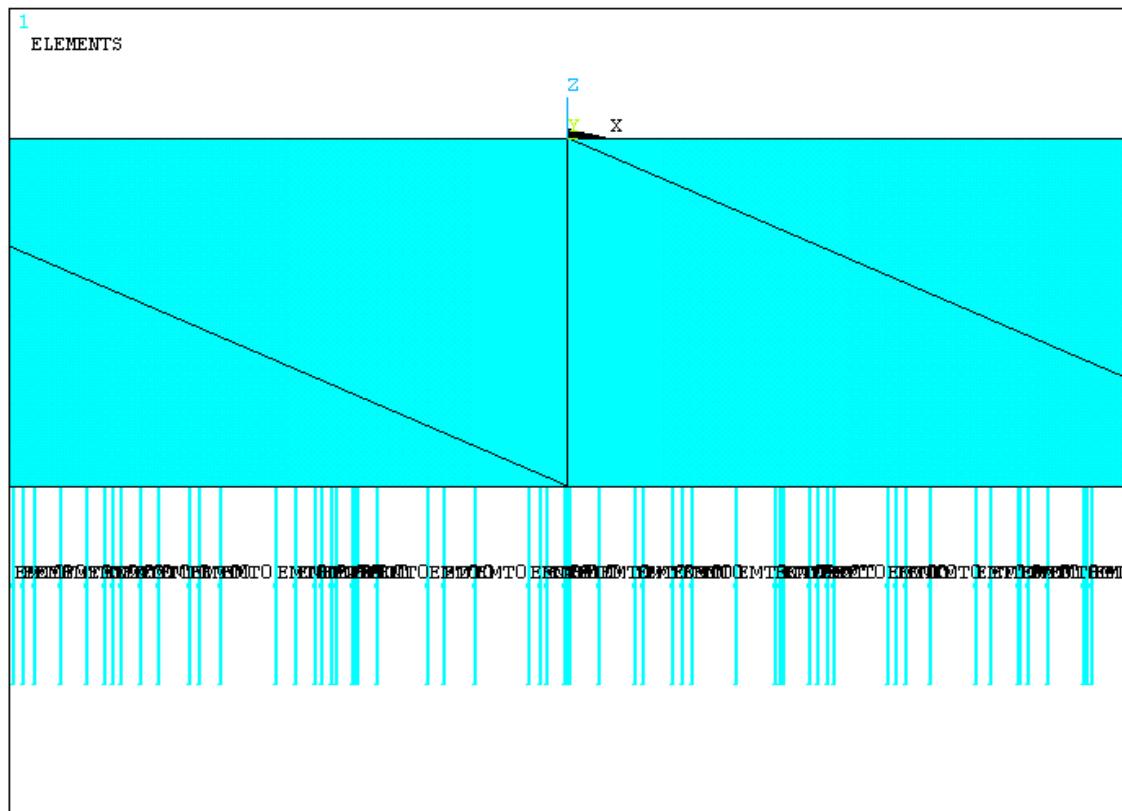
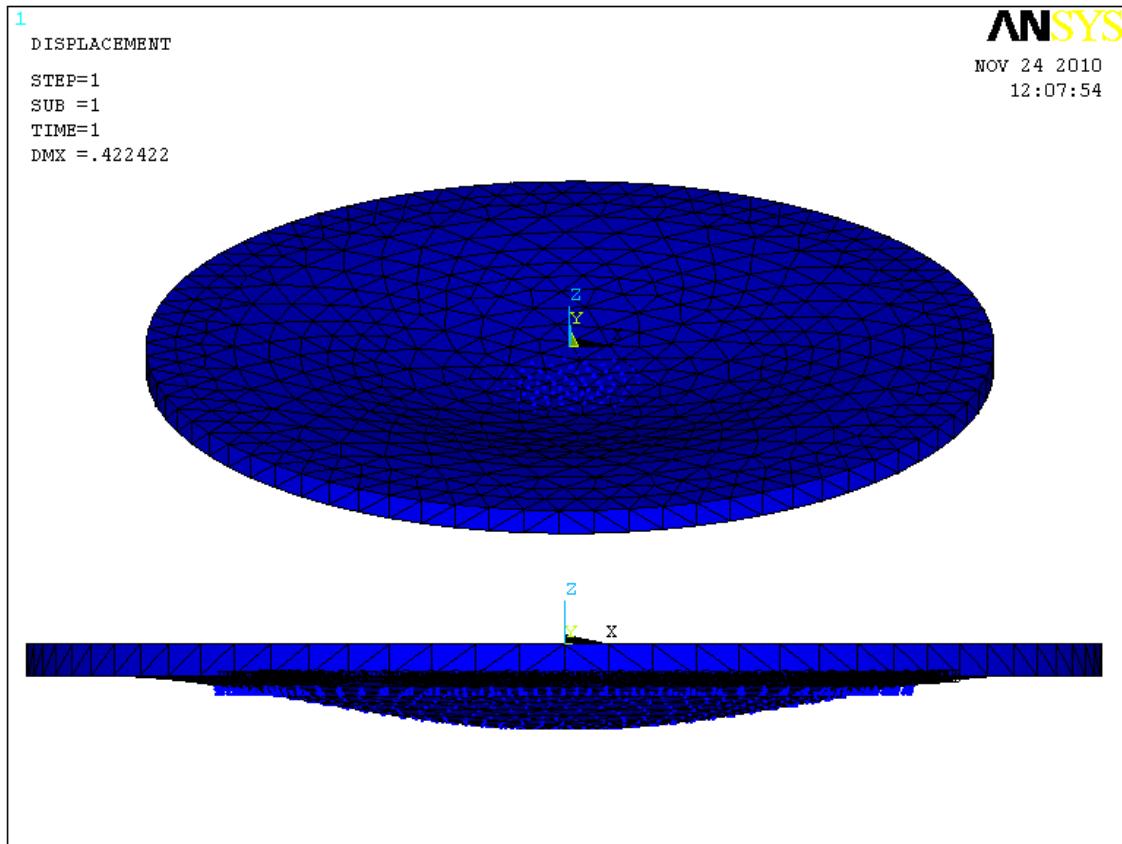


Figura 36 - Elementos da membrana e TRANS126.



**Figura 37 - Elementos da membrana e TRANS126 (vista mais próxima).**

Tendo modelado as forças elétricas, a simulação é feita com um gap de 2  $\mu\text{m}$ , tensão entre placas de 200 Volts, e apenas o ar como meio isolante, desconsiderando a pressão atmosférica. O resultado da simulação estática é apresentado pela **Figura 38**.



**Figura 38 - Deformação na membrana sujeita apenas a forças elétricas.**

### 5.3. Fabricação no LNLS

Os processos de fabricação executados no LNLS foram bastante diferentes dos processos planejados. Isso ocorreu porque praticamente todos os processos, além de serem inovadores no laboratório, envolvem reações químicas com substâncias perigosas e ambientes bem controlados, o que não é estudado na engenharia mecatrônica e também não é objetivo de estudo deste trabalho. Antes das realizações de muitos dos processos foram realizados pequenas experiências para verificação.

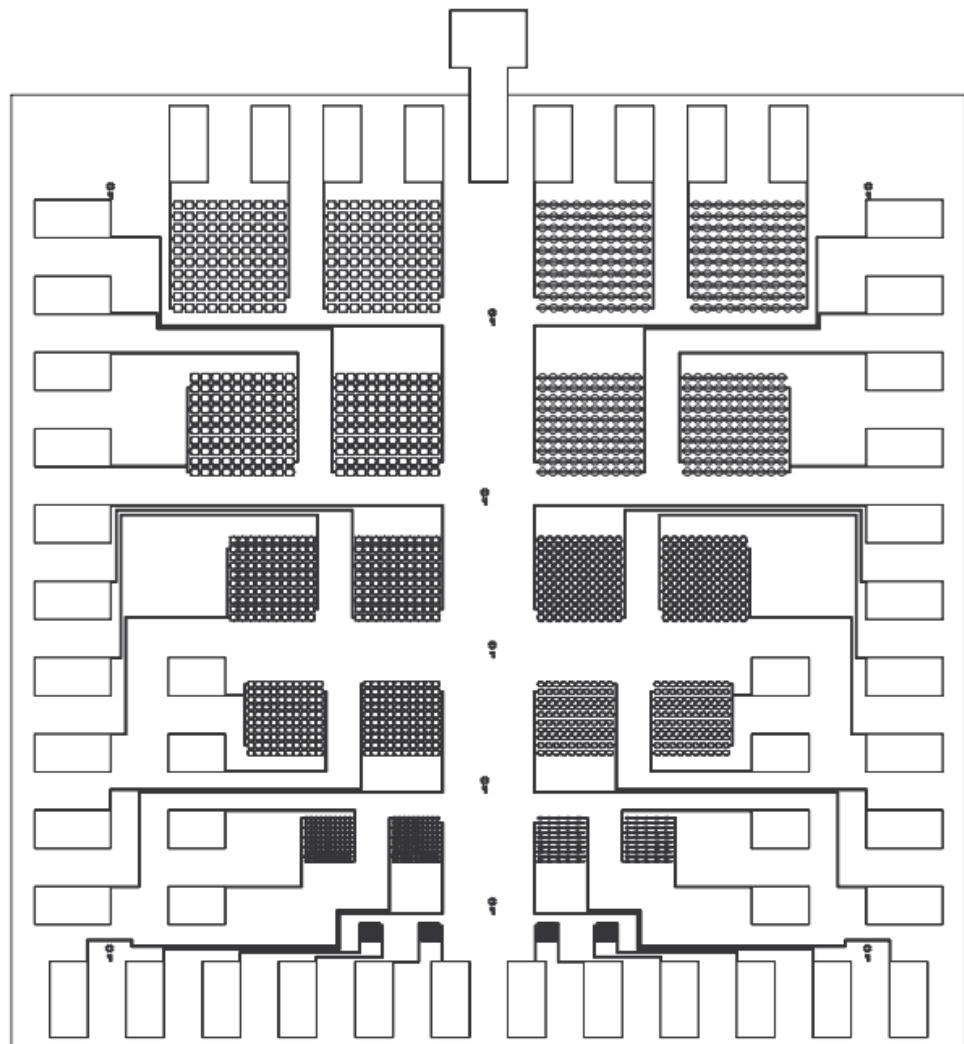
Nossos CMUTS foram construídos em conjunto com o aluno de mestrado Lucas Mendonça, também o autor dos projetos das máscaras utilizadas. As máscaras foram projetadas para a manufatura de CMUTS quadrados e circulares de diferentes tamanhos.

### 5.3.1. Máscaras

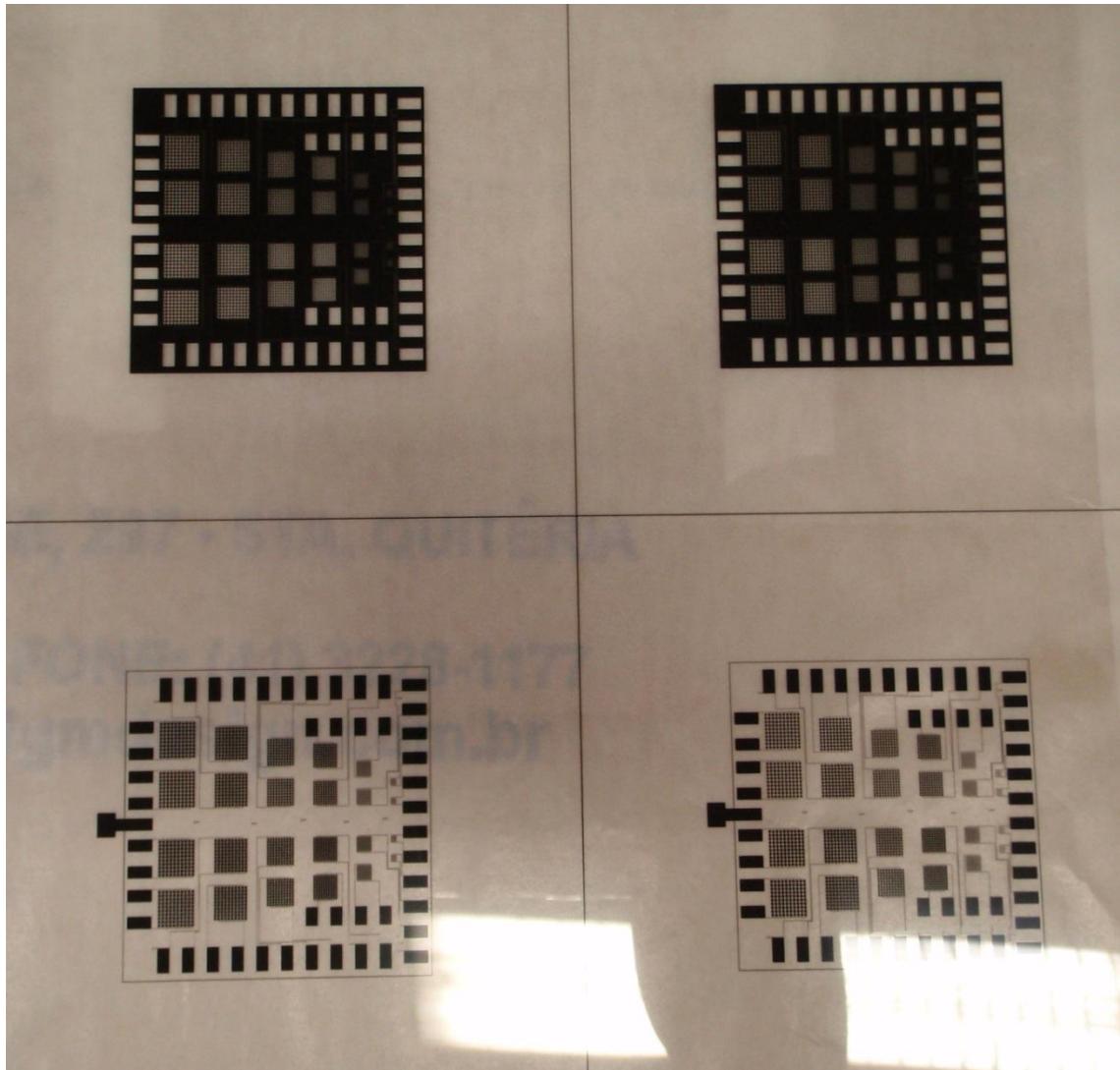
Cada bloco é um grupo composto por um array 10x10 membranas. Um lado tem membranas quadradas e o outro membranas redondas. As estruturas são nomeadas de E1 a E6, da menor para a maior. Então as dimensões ficam como na **Tabela 2**:

**Tabela 2 - Dimensões dos CMUTS fabricados.**

<i>Estrutura</i>	<i>Diâmetro ou lado da membrana (<math>\mu m</math>)</i>	<i>Espaço entre membranas (<math>\mu m</math>)</i>
E1	50	50
E2	200	50
E3	350	50
E4	350	100
E5	500	50
E6	500	100



**Figura 39 - Esquema dos CMUTS fabricados.**



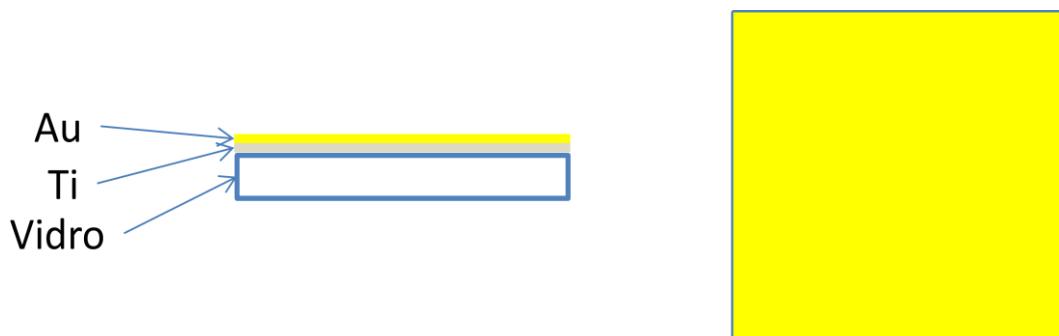
**Figura 40 - Máscaras utilizadas na fabricação**

A **Figura 39** - Esquema dos CMUTS fabricados. ilustra apenas como ficarão os CMUTS, não é uma ilustração fiel de nenhuma das máscaras. As máscaras, ilustradas na **Figura 17**, são fabricadas em pares positivos e negativos (uma é complementar a outra), pois assim podem ser aproveitadas com o uso de fotoresistos positivos ou negativos. É necessário um par de máscaras para a fabricação dos eletrodos e outro par para a abertura das cavidades.

### **5.3.2. Parte Inferior**

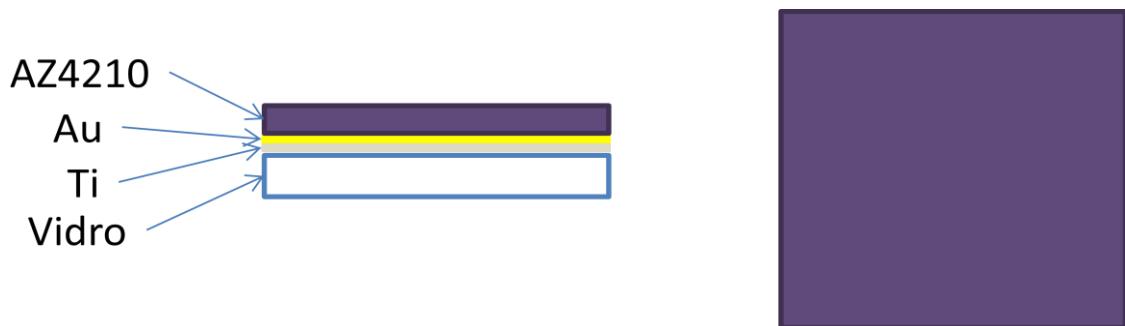
Diferentemente do que foi planejada, a parte inferior do protótipo foi fabricada a partir de um substrato de vidro com uma fina camada de titânio, e outra fina camada de

ouro. O vidro é um substrato bem eficiente por ser bastante rígido e pouco rugoso. A camada de titânio serve apenas para aderir o ouro no vidro, enquanto que a camada de ouro servirá de eletrodo inferior, isso porque o titânio, apesar de ser um metal, não tem boa condutividade elétrica, e o ouro, bom condutor, não tem boa adesão com o vidro. Esses substratos revestidos já haviam sido previamente fabricados no laboratório visando esta e outras possíveis aplicações. Uma ilustração esquemática apresentada pela **Figura 41**. Por conveniência foram fabricados 3 protótipos na sequencia.

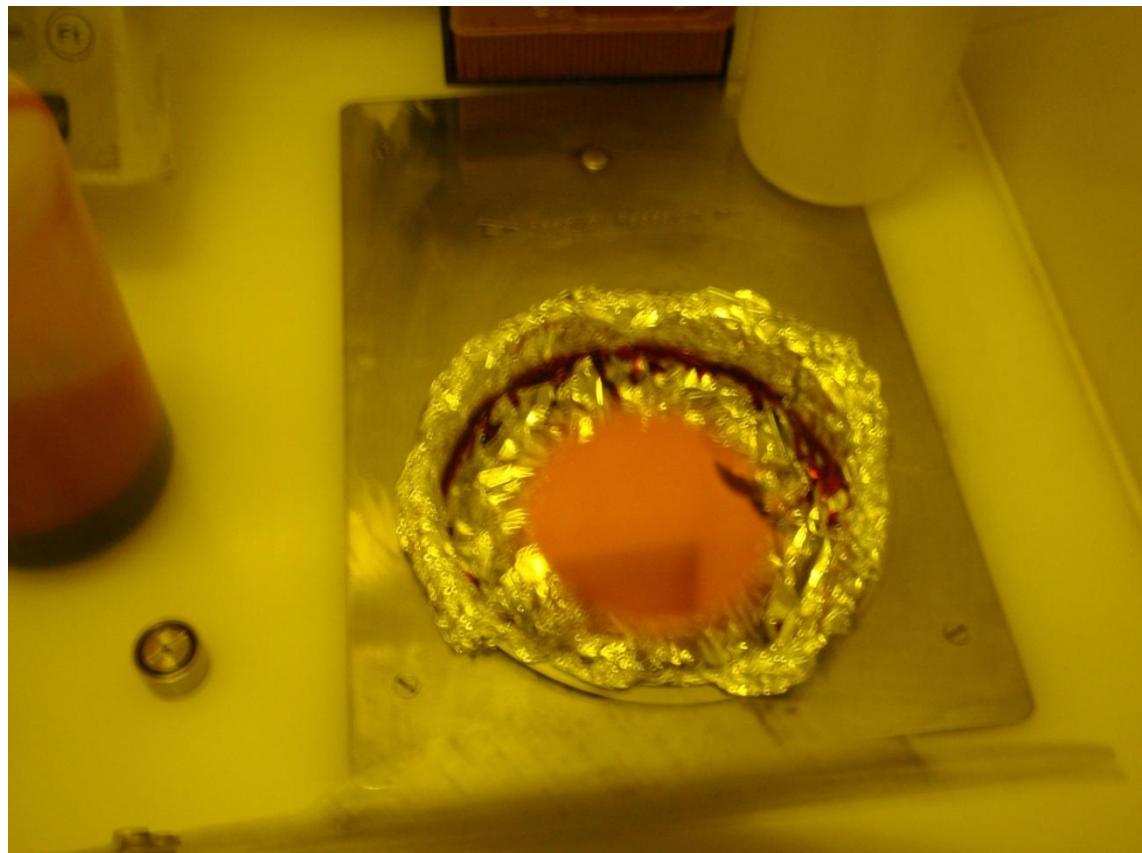


**Figura 41 - Ilustração esquemática com vista lateral e superior do substrato com uma camada de titânio e ouro.**

O processo segue com a deposição do material fotoresiste positivo AZ4210, logo após a aplicação de uma fina camada do promotor de adesão HMDS (hexamethyldisilazane). As duas aplicações são feitas por spin-coating (ver **Figura 42 e 43**).

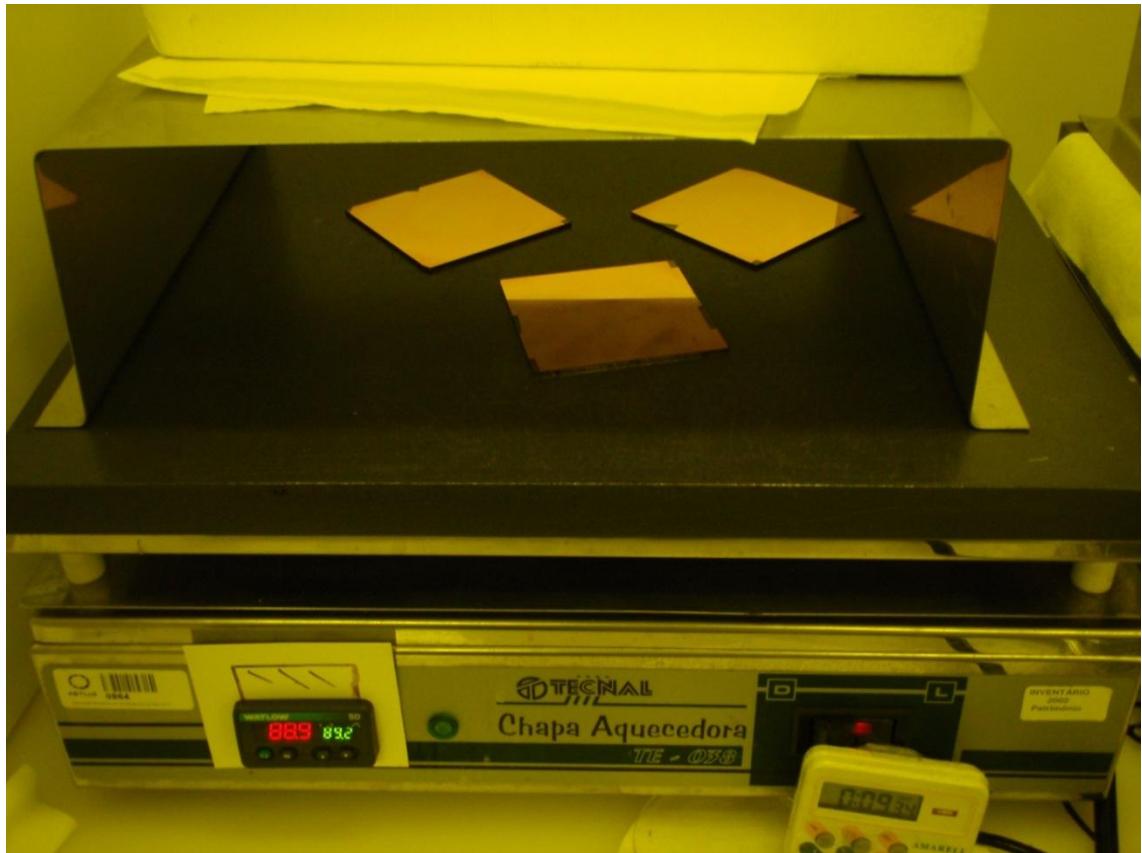


**Figura 42 - Ilustração esquemática com vista lateral e superior do substrato com uma camada de titânio, ouro e AZ4210.**



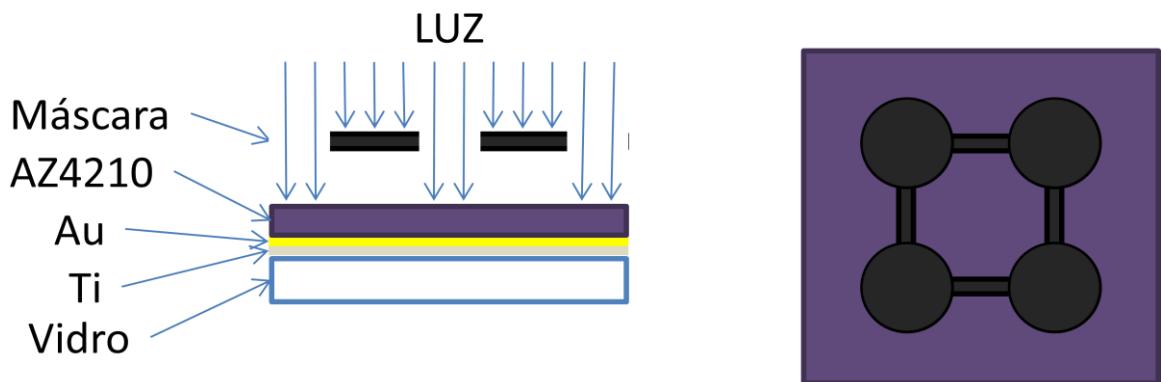
**Figura 43 – Processo de spin-coating realizado no laboratório.**

O spin-coating do HMDF é feito a 5000 rpm por 30 segundos e a deposição do AZ4210 é feita a 3500 rpm por 30 segundos, seguido do baking a 90 °C por 10 minutos (vide **Figura 434**).

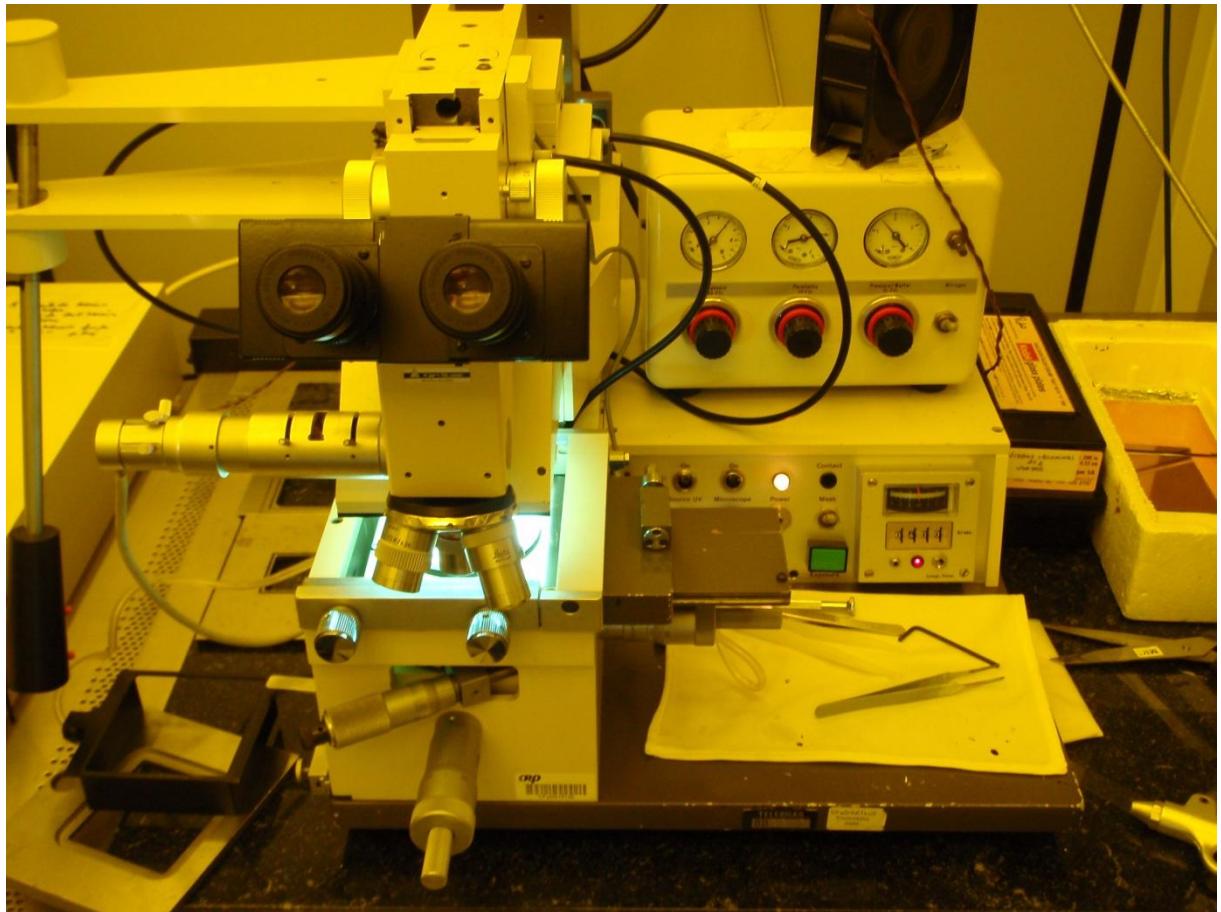


**Figura 44 – Processo de baking onde a chapa atinge 90°C.**

Com o fotoresiste já preparado, é feita a litografia com a primeira máscara (máscara positiva), como ilustrado pela **Figura 45**. O equipamento utilizado é ilustrado na **Figura 46**:



**Figura 45 - Ilustração esquemática do processo de litografia no AZ4210.**



**Figura 46 – Instrumentos utilizados para o processo de litografia.**

O tempo de exposição à luz é de 40 segundos (a expositora utiliza uma lâmpada de mercúrio e emite luz com comprimento de onda de 200 a 300 nm).

Após a exposição, o fotoresiste é exposto à seu revelador, o K400, diluído em água na proporção de 1:3, por aproximadamente um minuto (ver **Figura 47**). Depois o K400 é eliminado com água e as amostras são limpas com jatos de ar comprimido obtendo-se a seguinte configuração conforme a **Figura 48**.

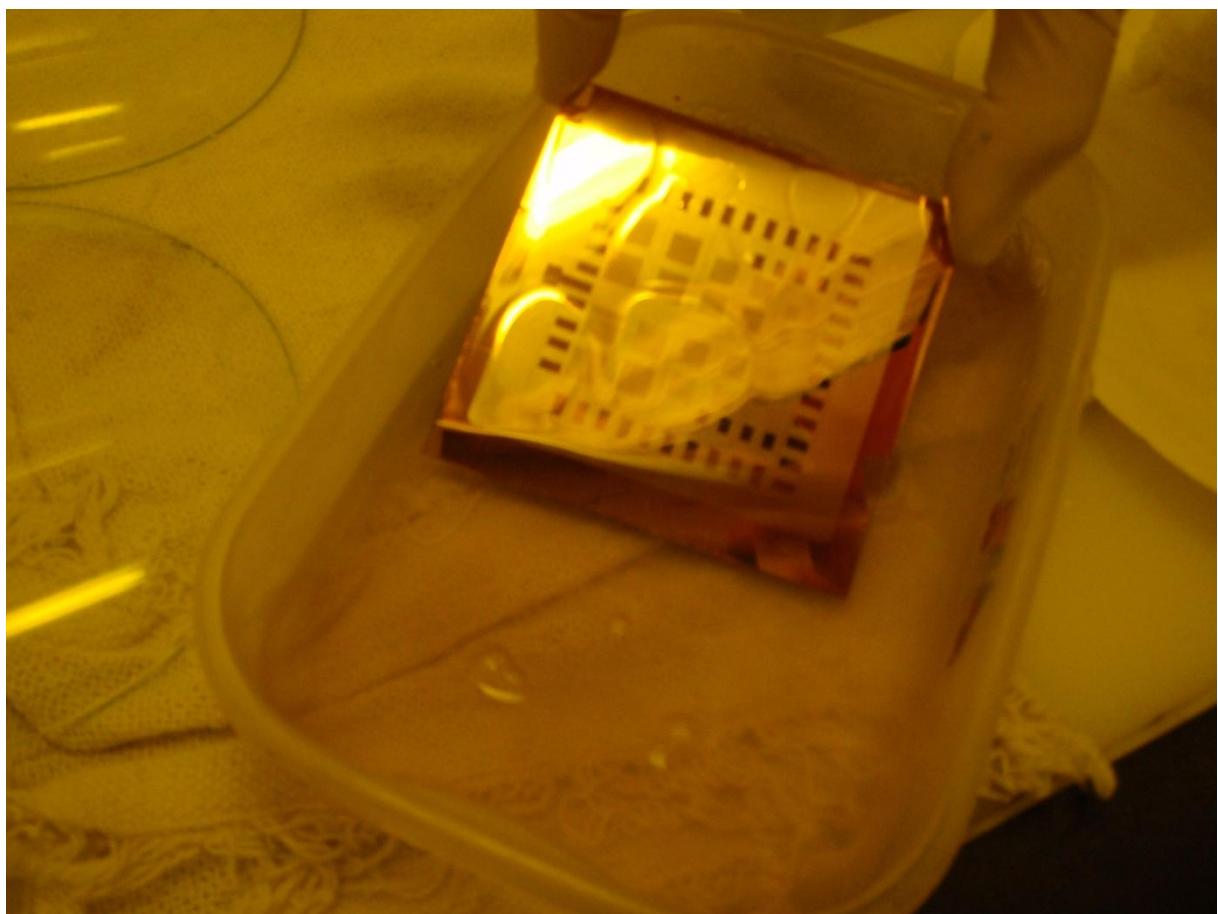


Figura 47 – Exposição do AZ4210 no revelador K400.

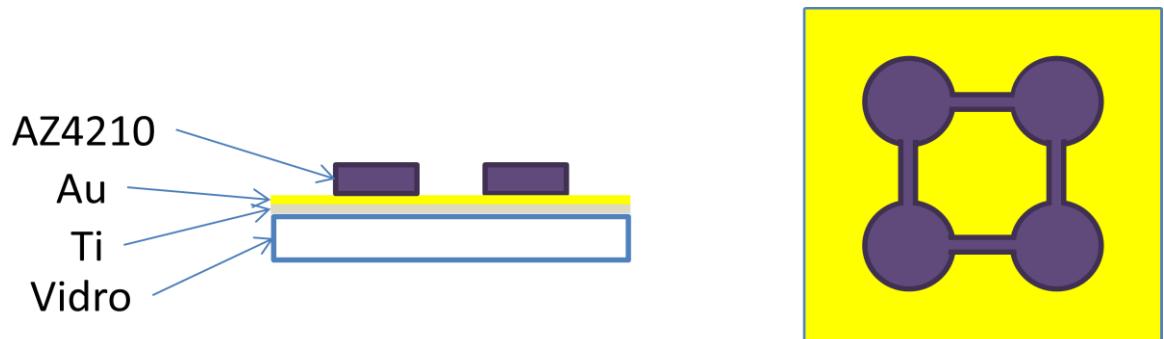
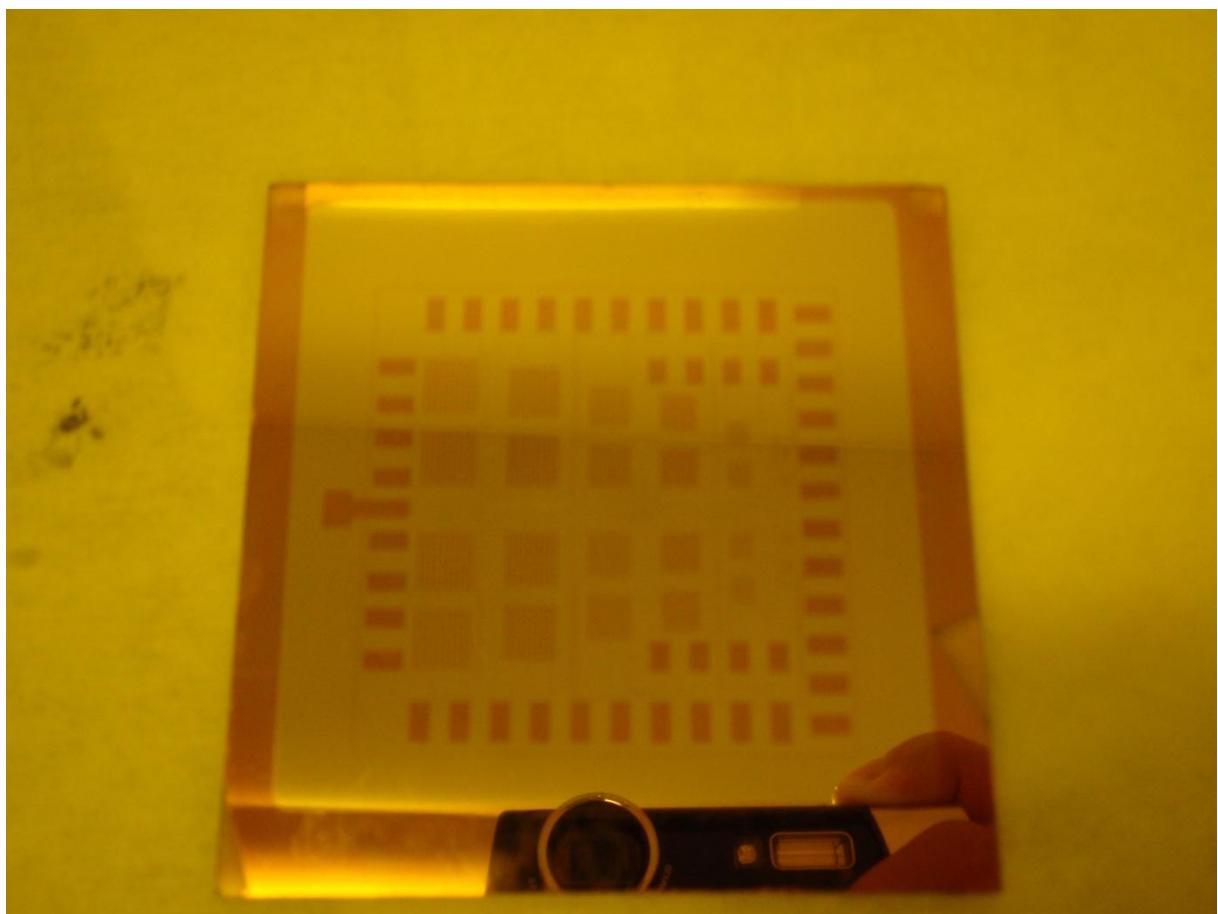
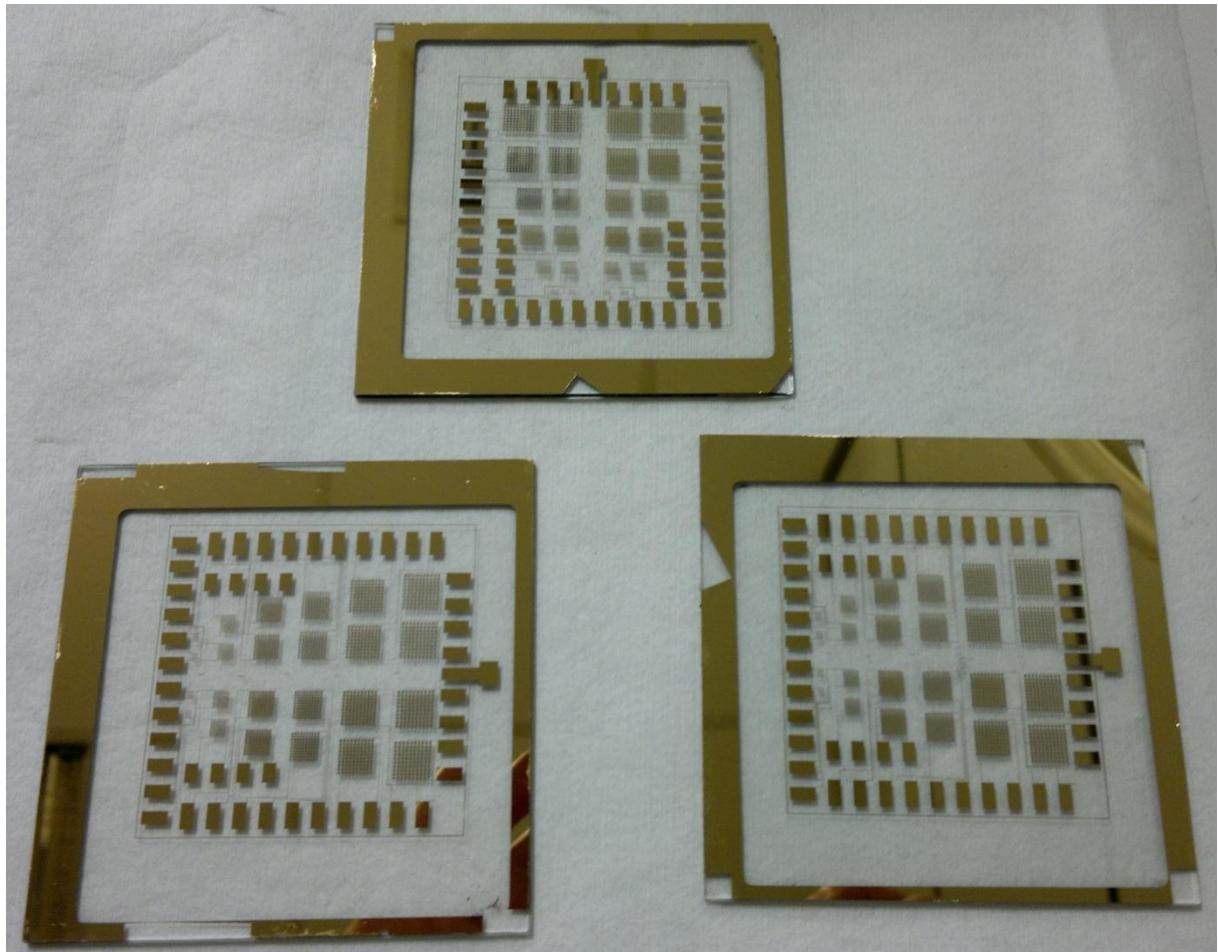


Figura 48 - Ilustração esquemática da parte inferior do CMUT após o término da litografia do AZ4210.



**Figura 49 – Parte inferior após a litografia do AZ4210 pronta para a remoção do titânio e do ouro.**

As próximas etapas são a remoção do ouro e do titânio na superfície desprotegida pelo AZ4210 (etapa usualmente chamada de etching na microfabricação). Primeiramente as amostras são aquecidas 90 °C. O ouro é removido com KCN (Cianeto de Potássio) e o titânio com HF (Ácido Fluorídrico). Depois da remoção das camadas de metal já se pode remover o AZ4210 com acetona pura. Após a limpeza já é possível vermos as amostras como na **Figura 50** e ilustrada esquematicamente pela **Figura 51**.

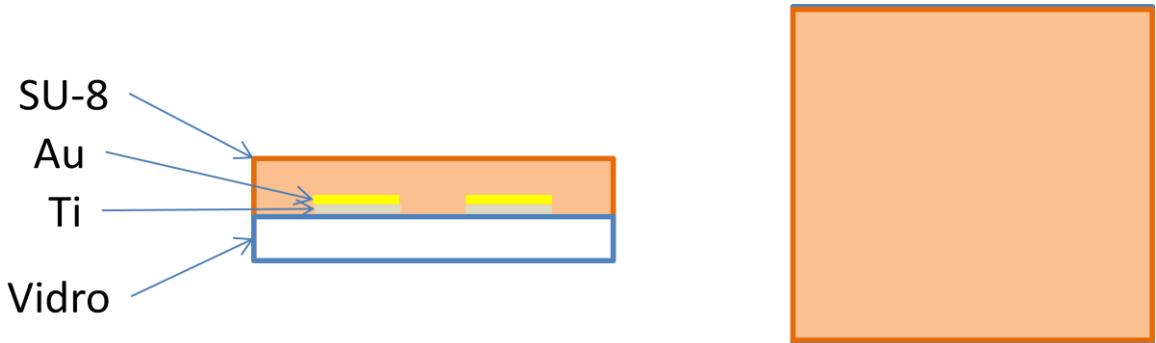


**Figura 50 – Três amostras da parte inferior prontas para receber a parte estrutural de SU-8**



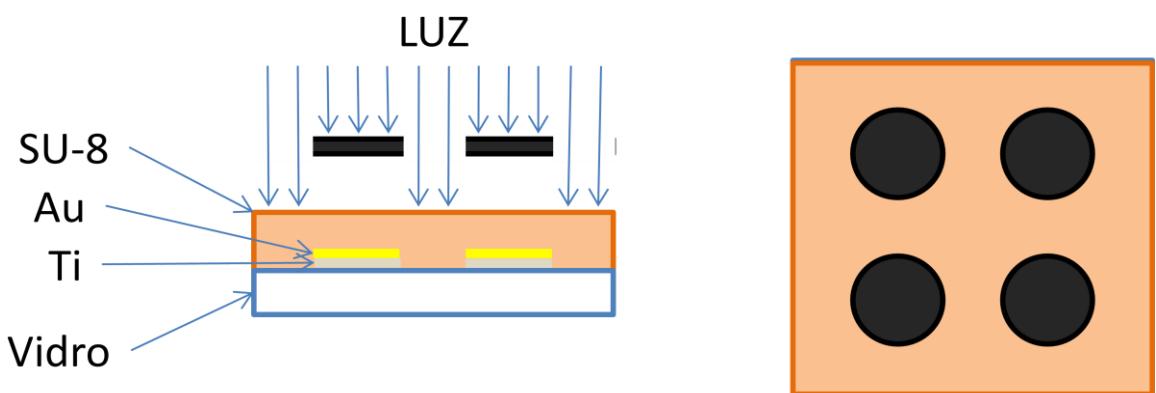
**Figura 51 - Ilustração esquemática após a remoção do excedente de titânio e ouro e limpeza do AZ4210.**

Agora é depositada uma camada de  $2 \mu\text{m}$  de SU-8, que servirá de suporte para as membranas. A amostra é pré-aquecida a  $90^\circ\text{C}$  e depois o SU-8 é depositado no spinner à 3000 rpm por 30 segundos. Depois disso é feito o baking do SU-8 em duas fases, a primeira por 1 minuto a  $65^\circ\text{C}$  e a segunda a  $95^\circ\text{C}$  por 3 minutos, assim obtém-se a configuração da **Figura 52**.



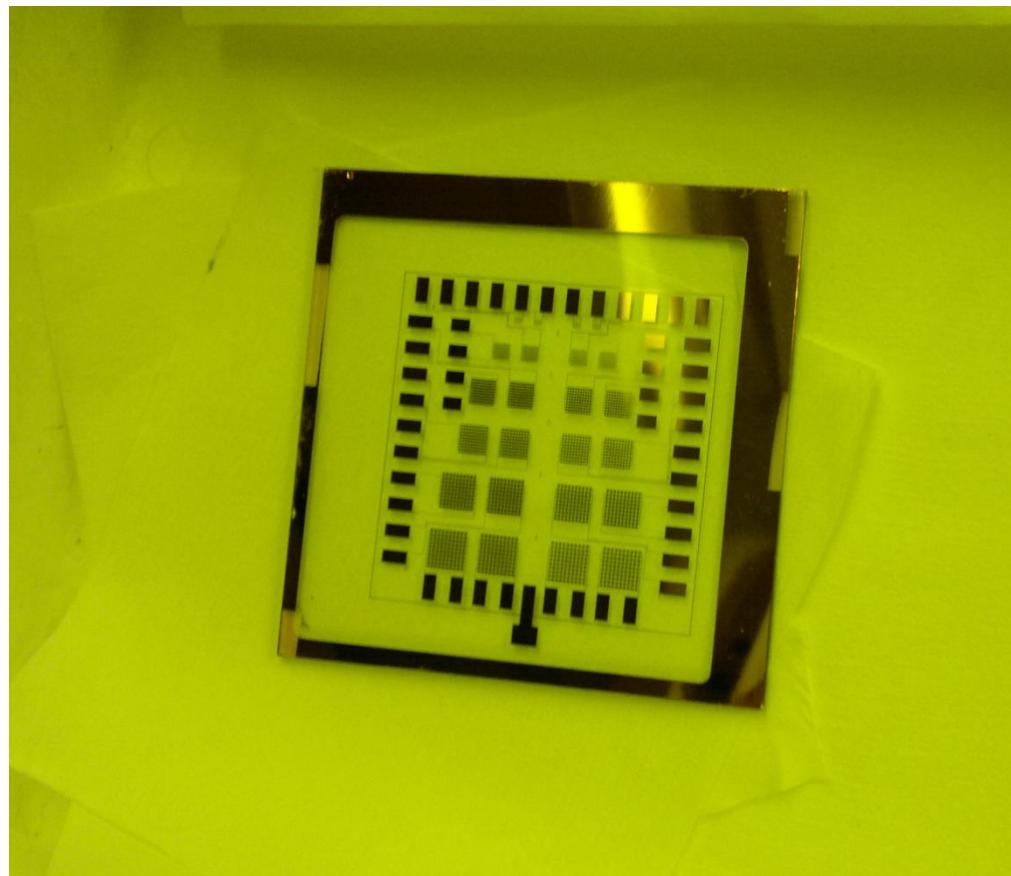
**Figura 52 - Após a deposição e baking so SU-8.**

Com o SU-8 já preparado é feita mais uma litografia. Este processo é mais demorado, pois a máscara deve estar bem alinhada em relação à amostra, e o processo de alinhamento pode ser bem demorado. Dessa vez é utilizada a segunda máscara, própria para a formação das cavidades, também positiva, lembrando que o SU-8 é um fotoresiste negativo. Com o alinhamento correto, a amostra é exposta à luz por 30 segundos, como é ilustrado pela **Figura 53**.

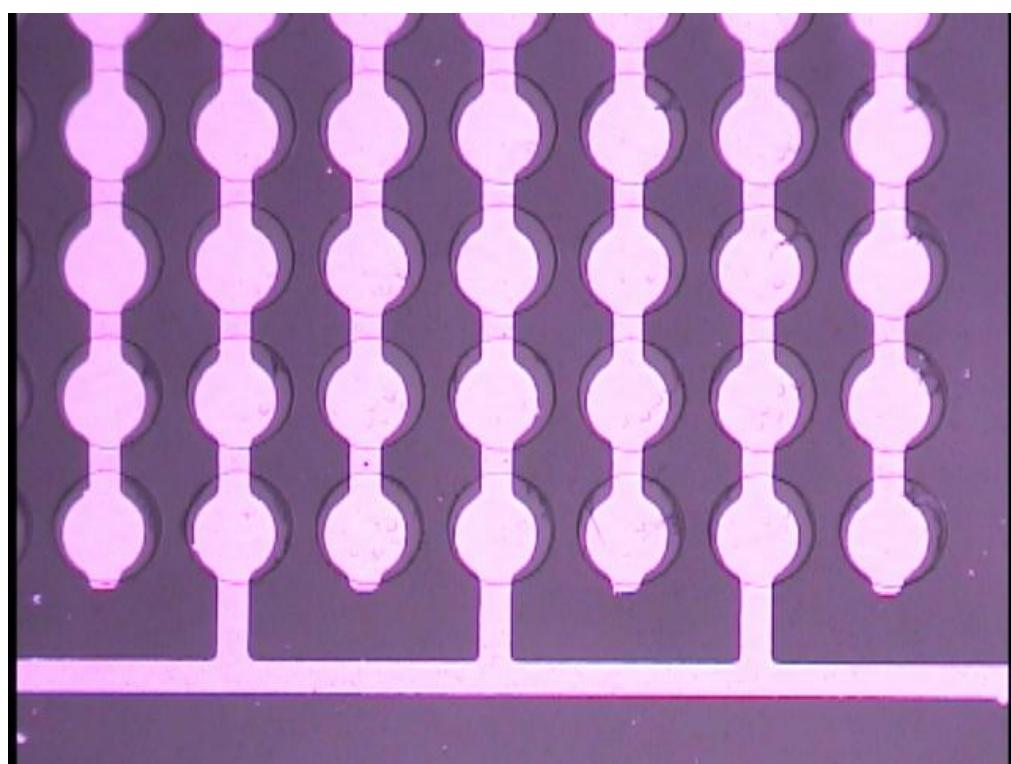


**Figura 53 - Ilustração esquemática do processo de litografia do SU-8.**

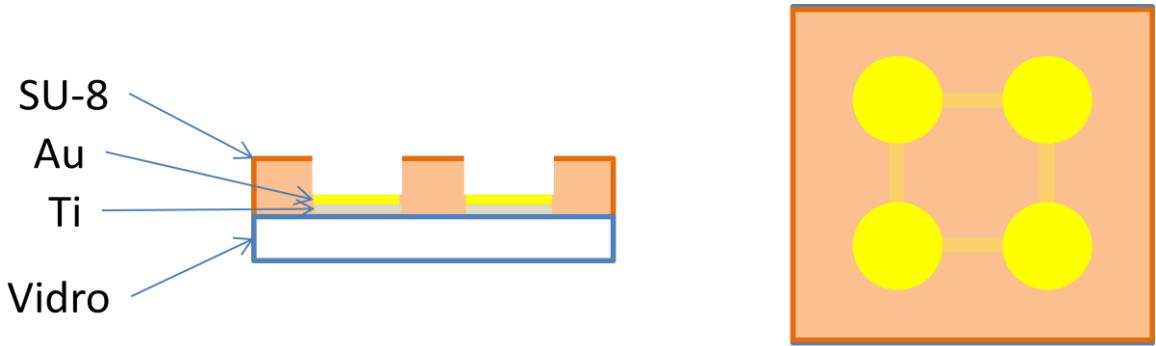
Depois disso é feita a revelação do SU-8 com sua substância reveladora, do próprio fabricante do SU-8 [13], e a limpeza deste com álcool isopropílico. Assim fica pronta a parte de baixo do CMUT como pode ser visto na **Figura 54**, **Figura 55** e como é esquematicamente ilustrada pela **Figura 56**.



**Figura 54 - Parte inferior pronta para o bonding.**



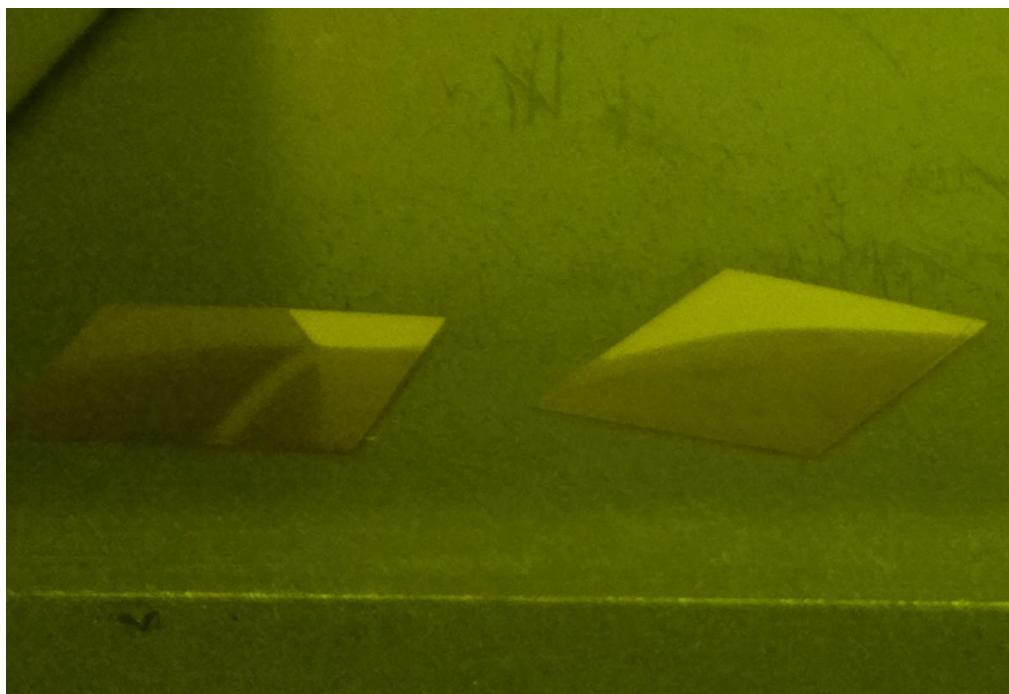
**Figura 55 - Zoom óptico de arrays de CMUT's (eletrodo inferior e estrutura transparente de SU-8).**



**Figura 56 - Ilustração esquemática da parte inferior do CMUT terminada.**

### 5.3.3. Parte superior

A parte superior requer um substrato flexível e transparente, pois será removido posteriormente e através dele deverá passar luz no processo da litografia. O acetato (ver **Figura 57**), filme plástico utilizado amplamente em transparências de retroprojetores, atende esses requisitos.



**Figura 57 - Placas de acetato utilizado como substrato para a estrutura superior**

No acetato, é depositada uma camada de AZ4210, da mesma maneira descrita no item 4.1.2. Depois é aplicada uma camada de 2  $\mu\text{m}$  de SU-8 que servirá de

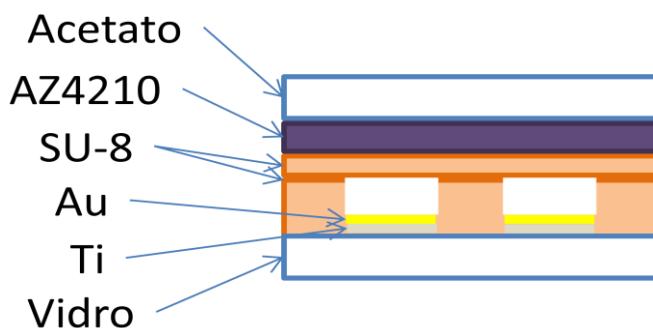
membrana, processo também análogo ao visto no item 4.1.2. Após a aplicação do SU-8, é feito o baking de forma incompleta obtendo-se a estrutura ilustrada pela **Figura 58**.



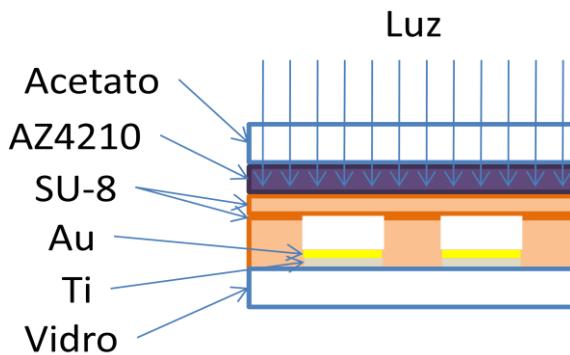
**Figura 58 - Ilustração esquemática com vista lateral e superior da metade superior do CMUT.**

#### 5.3.4. União das partes

Aqui a parte de cima e a parte de baixo fabricadas são unidas. Como o baking da parte superior foi feito de forma incompleta, as duas partes são unidas (ver **Figura 59**) e colocadas a vácuo, para garantir um bom contato entre elas. Depois de alguns minutos no vácuo, é feita a litografia sem máscara na amostra resultante, para que o SU-8 fique intacto e o AZ4210 seja inteiramente removido, já que a exposição à luz deixa o SU-8 (fotoresiste negativo) ativado e o AZ4210 (fotoresiste positivo) susceptível à remoção (ver **Figura 60**).

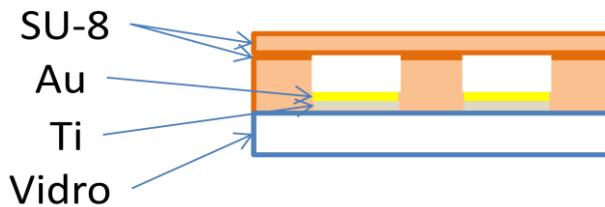


**Figura 59 - Parte superior e inferior do CMUT acopladas para o bonding entre as superfícies de SU-8.**



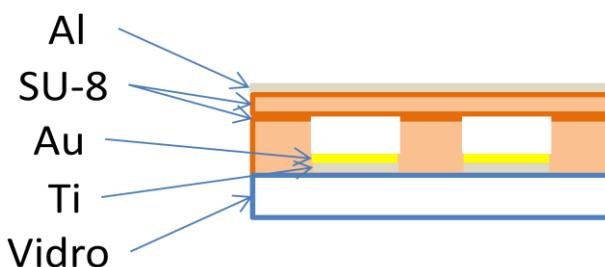
**Figura 60 - Ilustração esquemática do processo de litografia completa através do acetato para a remoção do AZ4210.**

Após a litografia, finaliza-se o baking, e o revelador K400 (revelador do AZ4210) é aplicado, de forma que todo o acetato possa ser removido, restando apenas a parte inferior mais a camada de SU-8, como mostrado na **Figura 61**.



**Figura 61 - Ilustração esquemática do CMUT quase finalizado após a remoção do acetato.**

A ultima etapa, portanto, seria a deposição de um filme de alumínio através do processo de evaporação, porém como não foram obtidos protótipos como esperado, este procedimento não foi possível de ser realizado. Porém idealizando o procedimento em laboratório, seria bem simples a formação do eletrodo superior, segue uma ilustração esquemática da configuração final do CMUT apresentada pela **Figura 62**.



**Figura 62 - Ilustração esquemática de configuração final do CMUT.**

## 6. Análise e Discussão de Alguns Resultados

Neste tópico serão apresentados alguns resultados que foram obtidos tanto com a modelagem quanto com a fabricação.

No que diz respeito à modelagem serão discutidos alguns valores obtidos para pequenas variações nas propriedades relevantes no processo de fabricação de um CMUT.

Quanto à fabricação será apresentado o protótipo obtido, assim as tentativas que foram executadas para se obter uma solução para os problemas encontrados.

### 6.1. Resultados da Modelagem

Com o modelo simplificado da membrana, é possível fazer um estudo de como as deformações e freqüências da membrana irão variar se sua geometria for alterada, ou se o material for trocado. São executadas as mesmas simulações feitas na seção 3.2.2 variando-se os parâmetros um a um. O resultados são apresentados na **Tabela 3**.

**Tabela 3 - Freqüências no primeiro modo de vibrar de acordo com o diâmetro e a espessura da membrana.**

Material	Modulo de elasticidade	Diâmetro	Espessura	Deflexão máxima	Freqüência do 1o Modo
SU-8	4 GPa	125 µm	3,5 µm	1,606 µm	786 KHz
SU-8	3 GPa	125 µm	3,5 µm	2,137 µm	681 KHz
SU-8	4 GPa	125 µm	4 µm	1,079 µm	897 KHz
SU-8	4 GPa	150 µm	4 µm	2,231 µm	624 KHz
SU-8	4 GPa	400 µm	14 µm	2,655 µm	305,5 KHz
SU-8	4 GPa	400 µm	11 µm	5,435 µm	241 KHz

Assim podemos verificar no que implica o aumento ou a diminuição de algum desses parâmetros da membrana. Um aumento no diâmetro implica no aumento da deflexão da membrana e também na diminuição da sua freqüência de ressonância. Já um aumento na espessura tem os efeitos inversos, diminuindo a deflexão e

aumentando a freqüência de ressonância. Caso se opte por mudar o material da membrana, como foi feito na segunda linha da tabela (o SU-8 pode ser diluído para se obter um material menos rígido), a utilização de um material mais rígido vem seguido de uma diminuição da deflexão e um aumento da freqüência de ressonância.

As freqüências obtidas nas quatro primeiras linhas são relativamente elevadas. Como ondas de alta freqüência atenuam muito rapidamente no ar talvez seja necessário futuramente trabalhar com uma freqüência mais baixa. Para isso foram feitas simulações que geraram os resultados apresentados nas duas ultimas linhas da tabela, conseguindo uma freqüência menor com o diâmetro e a espessura mais elevados.

## **6.2. Resultados da fabricação**

A seguir serão apresentadas as fotos obtidas da ultima etapa que foi realizada, pois não foi possível a obtenção do CMUT final devido às dificuldades encontradas durante o processo de fabricação, que serão discutidas a seguir. Nesta ultima fase, contamos com a criatividade em resolver problemas e com a experiência dos técnicos e responsáveis pelo laboratório de litografia do LNLS. Deve-se lembrar da limitação da tecnologia existente no Brasil, apesar de este ser o laboratório mais moderno dentre os que são acessíveis e existentes no território nacional.

Os dois maiores problemas foram com relação à junção das partes superior e inferior devido a não afinidade de junção de duas superfícies de SU-8 para a realização do bonding, assim algumas tentativas foram realizadas. A primeira, mais fácil, foi a “ativação” das superfícies através da utilização de plasma de gás oxigênio para que as superfícies se tornassem mais aderentes, porém não foi obtido sucesso. A segunda tentativa, foi analisar a eventual substituição do material da membrana superior por PMDS, material polimérico bastante resistente e muito utilizado pelo laboratório em questão, porém este material também não possuía grande afinidade em relação ao SU-8. Para tal, precisava-se depositar um filme de óxido de silício. A questão é que nesta tentativa constatou-se que a deposição de alumínio para a formação do eletrodo superior não se tornava viável, pois como o PMDS é muito mais flexível que o SU-8, o eletrodo se rompia em diversos lugares durante o manuseio, por se tratar de uma camada muito fina, e impossibilitava as conexões necessárias.

Assim, a solução encontrada para este problema foi a de se realizar o baking pela metade, pois o SU-8 só se tornava completamente incompatível com SU-8 após seu completo baking.

Entretanto, ainda existia mais um problema como a remoção do substrato utilizado como base para a fabricação da estrutura superior do CMUT. Neste ponto, o planejado era uma remoção normal do material de sacrifício depositado entre o substrato e a membrana de SU-8. Porém, como a espessura da membrana era muito inferior à normalmente trabalhada no laboratório, teve-se dificuldades pois o removedor do material de sacrifício iria destruir a membrana e também uma vez realizada o bonding entre as metades, o removedor teria grande dificuldades de penetrar entre os substratos para atingir o material de sacrifício devido à tensão superficial do líquido que resistiria à entrada na micro-cavidade formada. Assim, também se procurou utilizar o PMDS para se obter uma cavidade maior que permitisse que o removedor penetrasse, porém não existe uma substância que removesse o PMDS sem danificar a membrana.

Tentou-se também utilizar o PMDS como substrato, pois este permite a remoção de forma física, “puxando”, da membrana devido à sua não aderência às demais substâncias, porém esta propriedade não permite à formação da membrana de SU-8, pois durante o processo de spin-coating todo o material escoava para fora da superfície por falta de aderência entre os dois materiais. Tentou-se também retirar a membrana antes de se realizar o bonding, porém após a remoção da membrana do substrato, tornava-se impraticável o manuseio da membrana devido à sua espessura.

Assim, a solução encontrada foi de utilizar o fotoresiste AZ4210 como material de sacrifício e realizar o processo de litografia como remoção do material como explicado no item 645.3.4.

Assim, obteve-se o CMUT sem o eletrodo superior devido as dificuldades encontradas, os recursos limitados e a não familiarização dos processos descobertos durante as tentativas que culminaram em um acabamento não ideal para a continuação com a microfabricação. Os resultados obtidos podem ser observados nas **Figura 63, 64 e 65**.

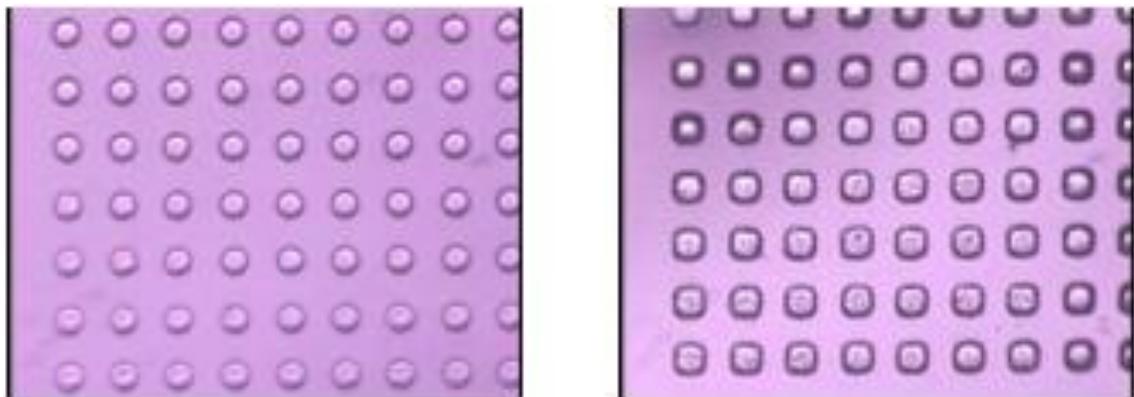


Figura 63 - Fotos ampliadas 10x do quadrante E1 (a) circular e (b) quadrada.

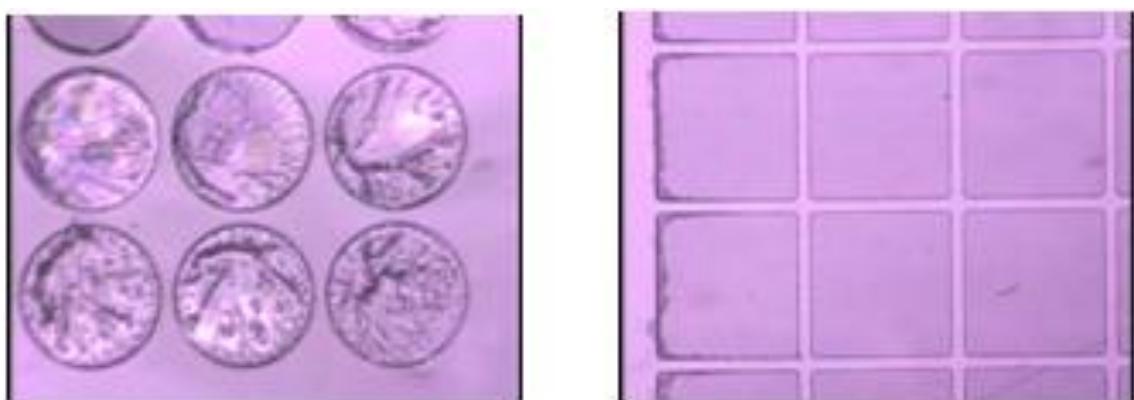


Figura 64 - Fotos ampliadas 10x do quadrante E5 (a) circular e (b) quadrada.

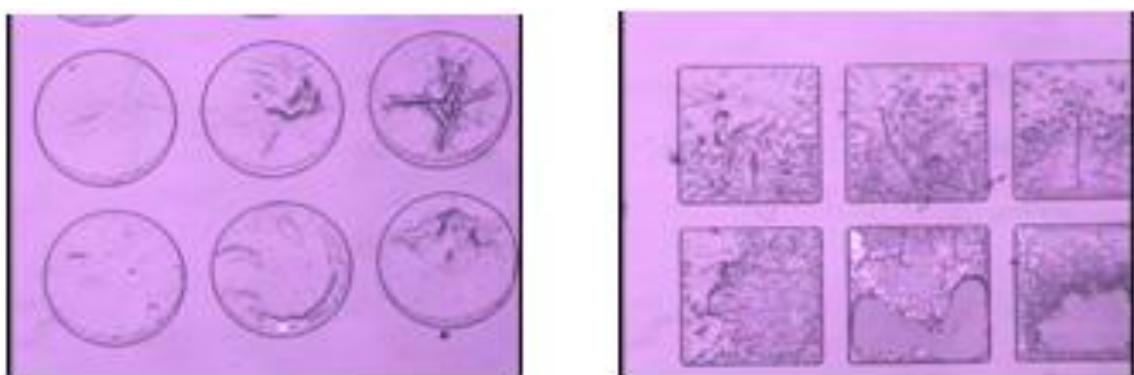


Figura 65 - Fotos ampliadas 10x do quadrante E6 (a) circular e (b) quadrada.

Percebe-se através das fotos que alguns CMUTs apresentam as membranas enrugadas, dificultando o seu funcionamento. Por outro lado, obteve-se também CMUTs “bons” que poderiam realizar a função de emissor e receptor adequadamente, porém o conjunto todo está interligado, o que comprometeria o funcionamento do conjunto.

## 7. Conclusões Finais

Com o modelo simplificado da membrana, é possível fazer um estudo de como as deformações e freqüências da membrana irão variar se sua geometria for alterada, ou se o material for trocado. Assim é possível verificar no que implica o aumento ou a diminuição de algum desses parâmetros da membrana. As freqüências obtidas nas quatro primeiras linhas são relativamente elevadas. Como ondas de alta freqüência atenuam muito rapidamente no ar talvez seja necessário futuramente trabalhar com uma freqüência mais baixa.

O protótipo fabricado apresentou algumas imperfeições, como o enrugamento das membranas superiores dos CMUTs devido ao processo de “Bonding” realizado. Apesar de não ter sido perfeito a junção, o projeto identificou que é viável a construção de um CMUT com SU-8 como parte estrutural. Assim, fica como sugestão o aperfeiçoamento desta técnica descrita para se ter um maior controle das variáveis envolvidas, permitindo uma melhor fabricação de CMUT nestas circunstâncias.

## 8. Sugestões para Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve como meta desenvolver a metodologia básica de modelagem e fabricação de CMUTs. Com os bons resultados obtidos, novos trabalhos poderão ser implementados. Algumas sugestões são apresentadas a seguir.

- Uso de CMUTs como sensor de distância para veículos autônomos submarinos ou terrestres.
- Detector de obstáculos para uso em robôs industriais.
- Medição de nível em silos (de grãos) e em reservatórios de líquidos.
- Dispositivos para ultrassonografia médica.
- Dispositivos para ensaios não-destrutivos de materiais.

## Referências

- [1] FAGANELLO, F. B.. **Ação do ultra-som terapêutico no processo de regeneração do músculo esquelético.** 2003. 99f. Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência da Motricidade (Área de concentração em Biodinâmica da Motricidade Humana).
- [2] O. ORALKAN, A. S. ERGUN, J. A. JOHNSON, M. KARAMAN, U. DEMIRCI, K. KAVIANI, T. H. LEE, AND B. T. KHURI-YAKUB, “**Capacitive micromachined ultrasonic transducers: Next-generation arrays for acoustic imaging?**,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 49, no. 11, pp. 1596-1610, 2002.
- [3] X. C. JIN, I. LADABAUM, AND B. T. KHURI-YAKUB, “**The microfabrication of capacitive ultrasonic transducers,**” IEEE J. Microelectromech. Syst., vol. 7, no. 3, pp. 295-302, Sep. 1998.
- [4] E. CIACI, V. FOGLIETI, D. MEMMI, G. CALIANO, A. CARONTI, AND M. PAPPALARDO, “**Fabrication of capacitive ultrasonic transducers by a low temperature and fully surface-micromachined process,**” J. Int. Soc. Precision Eng. Nanotechnol. 26, 347–354 ~2002!.
- [5] W. A. SMITH, “**The role of piezocomposites in ultrasonic transducers,**” in Proc. IEEE Ultrasonics Symposium, 1989.
- [6] A. CARONTI, G. CALIANO, R. CAROTENUTO, A. SAVOIA, M. PAPPALARDO, E. CIACI, V. FOGLIETTI, “**Capacitive micromachined ultrasonic transducer (CMUT) arrays for medical imaging**” Microelectronics Journal 37 (2006) pp. 770-777.
- [7] HALLER, M. I. & KHURI-YAKUB, B. T. **A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer.** IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectr Freq. Control 43, 1–6 (1998).

- [8] MANTHEY, W. KROEMER, N. & MAGORI, V. **Ultrasonic transducers and transducer arrays for applications in air.** Meas. Sci. Technol. 3, 249–261 (1992).
- [9] ALLEN, J. J. (2005). **Micro Electro Mechanical System Design.** Taylor & Francis Group.
- [10] GAD-EL-HAK, M. **The MEMS Handbook.** [S.I.]: CRC Press, 2002.
- [11] YOUNG, W. C.; BUDYNAS, R. G. **Roark's Formulas for Stress and Strain.** 7. ed. [S.I.]: [s.n.], 2002.
- [12] SU-8: Thick Photo-Resist for MEMS. **Memscyclopedia.org - Free MEMS Encyclopedia.** Disponivel em: <<http://memscyclopedia.org/su8.html#>>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- [13] MicroChem. **MicroChem Corp.** Disponivel em: <<http://www.microchem.com/>>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- [14] AISI 1020 Steel, cold rolled. **Matweb - Material Property Data.** Disponivel em:  
<<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cffbb&ckck=1>>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- [15] SAPCO Silicon Nitride, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. **Matweb - Material Property Data.** Disponivel em:  
<<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9711f4272496460f8a59f566af45b4bf>>. Acesso em: 13 abr. 2010.
- [16] CROCKER, MALCOM J., **Handbook of Acoustics**, Wiley, N. Y., 1998
- [17] WEIGHT, J.P., **Ultrasonic Beam Structures in Fluid Media**, J. Acoust. Soc. Am., v.76, p.1184-1191, 1984