

MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS DE TRANSDUTORES ULTRASSÔNICOS CAPACITIVOS COM CAVIDADE TRIANGULAR

Manlius Caesar Torquato dos Santos Rocha, manlius@usp.br¹
Flávio Buiochi, fbuiochi@usp.br¹

¹ Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes 2231, São Paulo, Brazil, CEP: 05508-030.

Resumo: Este trabalho trata da modelagem por elementos finitos de transdutores ultrassônicos capacitivos operando em emissão, utilizando-se o software ANSYS. É usado também o software MATLAB na implementação de rotinas para analisar os resultados e para simular o campo acústico gerado pelo transdutor. A modelagem prevê a determinação dos parâmetros de projeto (frequência de ressonância, deslocamento da membrana). O modelo do transdutor foi representado por dois meios: o ar presente nas cavidades (ranhuras) com geometria triangular e a membrana de poliéster. Foram realizadas, para duas espessuras de membrana (12 e 20 μm) e seis larguras de ranhura entre 0,75 e 2 mm, análises eletrostáticas para obter a distribuição da força eletrostática ao longo da membrana e análises mecânicas estáticas para verificar a deformação da membrana devido à força eletrostática. Foram realizadas também as análises modal e harmônica para obter, respectivamente, as frequências de ressonâncias e a resposta em frequência. Considerou-se no modelo a pré-tensão mecânica aplicada à membrana. São apresentados o modelo, os resultados obtidos nas simulações e na verificação experimental.

Palavras-chave: Transdutor capacitivo, ultrassom, modelagem por elementos finitos, emissão em ar.

1. INTRODUÇÃO

Um transdutor capacitivo típico é constituído por um disco metálico com ranhuras concêntricas sobre o qual se encontra uma membrana de poliéster metalizada em uma das faces, formando os eletrodos de um capacitor como mostra a Fig. 1. A membrana está tensionada sobre o disco metálico, de forma que toca todos os pontos dos ápices das ranhuras. O espaço da ranhura é preenchido com ar que atua como uma mola, quando comprimido pela membrana. Um campo elétrico aplicado entre o disco metálico e a metalização da membrana faz com que esta se deforme elasticamente. Ao cessar o campo elétrico, a membrana tende a voltar para a posição normal devido à força de restituição resultante do tensionamento e devido à expansão do ar contido na ranhura.

O transdutor ultrassônico capacitivo pode operar tanto em emissão como em recepção. Como emissor, aplica-se uma tensão elétrica constante de polarização em conjunto com uma alternada entre o disco metálico e a superfície metalizada da membrana, gerando-se um campo elétrico variante que provoca oscilações na membrana. Como consequência, ocorrem oscilações longitudinais de pressão no ar que produzem as ondas acústicas. Como receptor, as ondas acústicas ao atingirem o transdutor, deformam a membrana produzindo uma variação na capacitância e, consequentemente, gerando uma tensão elétrica proporcional à pressão acústica aplicada. Neste trabalho, estuda-se apenas o modelo da emissão.

Haller *et al.* (1994), mostra que os transdutores capacitivos possuem sua impedância acústica muito próxima à impedância do ar, que os tornam mais eficientes na emissão no ar quando comparados com os transdutores piezoelétricos. Os transdutores capacitivos podem ser utilizados em ensaios não destrutivos por ultrassom, como mostram os trabalhos de Hayward (1997) e Grandia (1995), sendo uma opção desejada quando não é permitido o uso de líquido que faça o acoplamento entre o transdutor e a peça a ser inspecionada, pois isso danificaria o material em contato e dificultaria a automatização da inspeção. Furukawa *et al.* (1993), mostra que os transdutores capacitivos também podem ser aplicados na medição de distâncias, na detecção de obstáculos em robôs e como sensores de proximidade. Wygant *et al.* (2008), mostra que os transdutores capacitivos podem ser utilizados na emissão de ondas acústicas direcionais, possibilitando delimitar o campo acústico gerado à uma pequena área.

Para a correta utilização do transdutor capacitivo nas diversas aplicações é necessário se ter um controle sobre os parâmetros de projeto: a frequência de ressonância e os deslocamentos da membrana, que ocorrem devido à aplicação de tensões elétricas. Kinsler (1982), mostra que no início dos estudos desses transdutores propunham-se modelos analíticos de corda vibrante. Posteriormente, surgiram trabalhos que levavam em conta o efeito da camada de ar, como

mostra o trabalho de Mattila *et al.* (1995). Adamowski *et al.* (1994) mostra em seu trabalho o uso do método de elementos finitos para determinação dos parâmetros de projetos, tendo considerado o ar presente dentro das cavidades e a tensão mecânica aplicada na membrana.

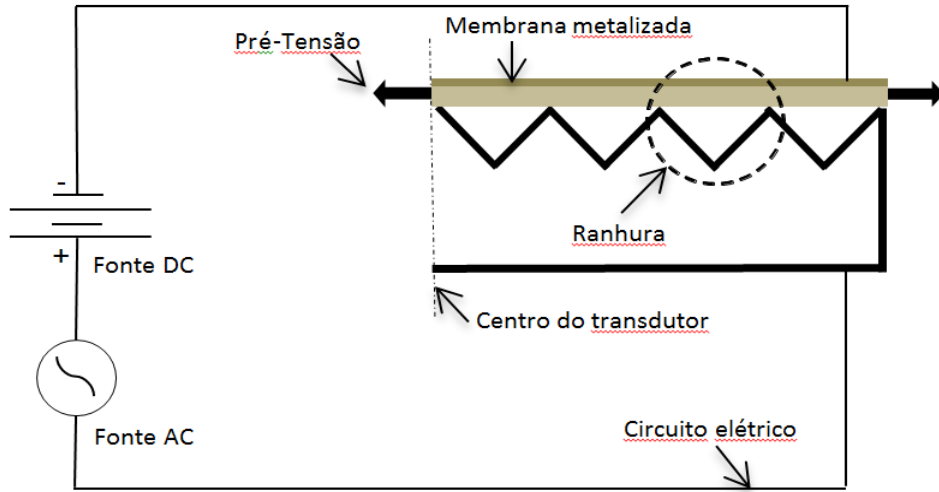


Figura 1. Desenho esquemático do conjunto transdutor e circuito elétrico.

2. TEORIA

O método dos elementos finitos (MEF) é um procedimento numérico que permite obter uma solução aproximada de problemas envolvendo geometrias complexas. O MEF se utiliza da divisão da estrutura em áreas discretas de menor complexidade, chamadas de elementos. Os elementos são compostos por linhas, áreas e nós, que conectam elementos vizinhos formando uma malha de elementos. Para cada elemento é realizado o balanço de forças onde é possível determinar um conjunto de equações. As equações de cada elemento são unidas formando um sistema de equações.

Bathe 1982, mostra o sistema de equações, Eq. (1), que são utilizadas nas análises mecânicas implementadas neste trabalho.

$$[M_{UU}]\{\ddot{U}\} + [C_{UU}]\{\dot{U}\} + [K_{UU}]\{U\} = \{F\} \quad (1)$$

onde $[M_{UU}]$ é a matriz de massa, $\{\ddot{U}\}$ é o vetor aceleração de cada nó, $[C_{UU}]$ é a matriz de amortecimento, $\{\dot{U}\}$ é o vetor velocidade de cada nó, $[K_{UU}]$ é a matriz de rigidez, $\{U\}$ é o vetor de deslocamentos de cada nó e $\{F\}$ é o vetor que representa as forças mecânicas, atuantes no sistema.

As análises elétricas realizadas neste trabalho foram feitas através da analogia com a análise térmica. Dada a lei diferencial de Gauss para fluxo do campo elétrico, Eq. (2), e a lei de geração interna de calor definida pela termodinâmica, Eq. (3), identifica-se a analogia existente entre os dois fenômenos elétrico e térmico.

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \Phi) = \rho \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (K \nabla T) = \ddot{q} \quad (3)$$

onde, ϵ é a permissividade elétrica, $\nabla \Phi$ é o gradiente do potencial elétrico, ρ é a densidade de carga, K é a condutividade térmica, ∇T é o gradiente de temperatura e $\ddot{q}$ é a taxa de geração térmica. Além disso, há uma relação de semelhança entre o deslocamento elétrico $\vec{D}$, que atua na membrana, e o vetor fluxo de calor $\vec{q}$, definidos, respectivamente, pelas Eqs. (4) e (5).

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (4)$$

$$\vec{q} = -K \nabla T \quad (5)$$

sendo $\vec{E} = \nabla \Phi$ a definição de campo elétrico e a Eq. (5) a forma diferencial da lei de Fourier.

O sistema de equações resolvido pelo ANSYS é representado pela Eq. (6), que representa o fenômeno térmico, conforme mostrado no manual Ansys (1994).

$$[C^t]\{\dot{T}\} + [K^{tm}]\{T\} = \{Q^f\} \quad (6)$$

onde, $[C^t]$ é a matriz de amortecimento térmico, $\{\dot{T}\} = \left\{\frac{\partial T}{\partial t}\right\}$ é o vetor derivada da função temperatura $T = T(x, y, z, t)$, $[K^{tm}]$ é a matriz de condutividade por condução, $\{T\}$ é o vetor temperatura e $\{Q^f\} = \vec{q}$, vetor fluxo térmico.

Assim, obtêm-se os vetores campo elétrico $\vec{E} \equiv -\nabla T$ e deslocamento elétrico $\vec{D} \equiv \vec{q}$, cujos resultados permitem determinar o vetor força elétrica $\vec{F}_{ele}$ atuando na membrana, como mostra a Eq. (7).

$$\vec{F}_{ele} = D_y S \vec{E} \quad (7)$$

onde D_y é a componente do vetor deslocamento elétrico na direção y (perpendicular à membrana) e S é a área da membrana. A força elétrica é calculada em cada nó da discretização da superfície superior da membrana no modelo usado no MEF.

3. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

Nas análises que se seguem, eletrostática, estática, modal e harmônica, a geometria do modelo é definida pela membrana e metade da cavidade de uma única ranhura localizada a 10 mm em relação ao eixo central do disco do transdutor de diâmetro 40 mm, conforme mostra a Fig. 2.

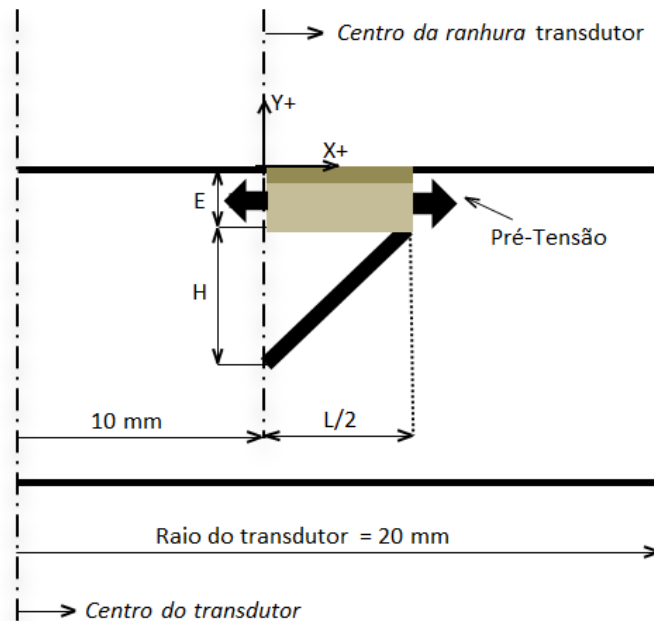


Figura 2. Geometria do modelo posicionada em relação ao eixo y (centro do disco metálico) a uma distância $R=10\text{mm}$, representando metade de uma ranhura triangular com pré-tensão na membrana.

Como o transdutor capacitivo é cilíndrico e as ranhuras são concêntricas, são utilizados elementos axissimétricos. Foi usado o elemento quadrado PLANE42 para análise eletrostática, e os elementos PLANE55 e FLUID79, respectivamente, para a membrana e o ar, nas análises mecânicas. As dimensões utilizadas no modelo foram: profundidade $H = 0,375\text{ mm}$, largura da ranhura $L = 0,75, 1, 1,35, 1,5, 1,75$ e 2 mm e espessura da membrana $E = 12\text{ }\mu\text{m}$ e $20\text{ }\mu\text{m}$. Cada medida de largura foi analisada nas duas diferentes espessuras, mantendo a profundidade de $0,375\text{ mm}$ e aplicando pré-tensões mecânicas de $7,13 \times 10^6\text{ N/m}^2$ e $4,31 \times 10^6\text{ N/m}^2$, respectivamente, para $12\text{ }\mu\text{m}$ e $20\text{ }\mu\text{m}$.

Inicialmente é feita a análise elétrica, determinando a distribuição da força elétrica ao longo da membrana, para uma tensão elétrica de polarização de 200 V DC . Essa distribuição é utilizada como carregamento nas análises estática e harmônica, o que permite avaliar os deslocamentos ao longo da membrana, respectivamente para uma condição estática e para qualquer frequência de excitação.

Em seguida é feita a análise estática e determinado os deslocamentos dos nós da superfície superior da membrana, que inicialmente encontra-se na posição não deformada. Após a primeira iteração, verificou-se a convergência dos deslocamentos, pois com a aplicação da tensão de polarização DC, a membrana se deforma para o interior da cavidade e essa deformação provoca mudança nos valores das forças elétricas e, conseqüentemente, mudança nos deslocamentos. Verifica-se que os deslocamentos convergem após a terceira iteração, como mostram as Figs. 3(a) e 3(b), respectivamente, para as espessuras de $12\text{ }\mu\text{m}$ e $20\text{ }\mu\text{m}$, considerando somente o deslocamento central da membrana. Os valores negativos dos deslocamentos apenas indicam que os deslocamentos foram contrários à referência do eixo Y utilizada, mostrando que a membrana se deforma no sentido da cavidade.

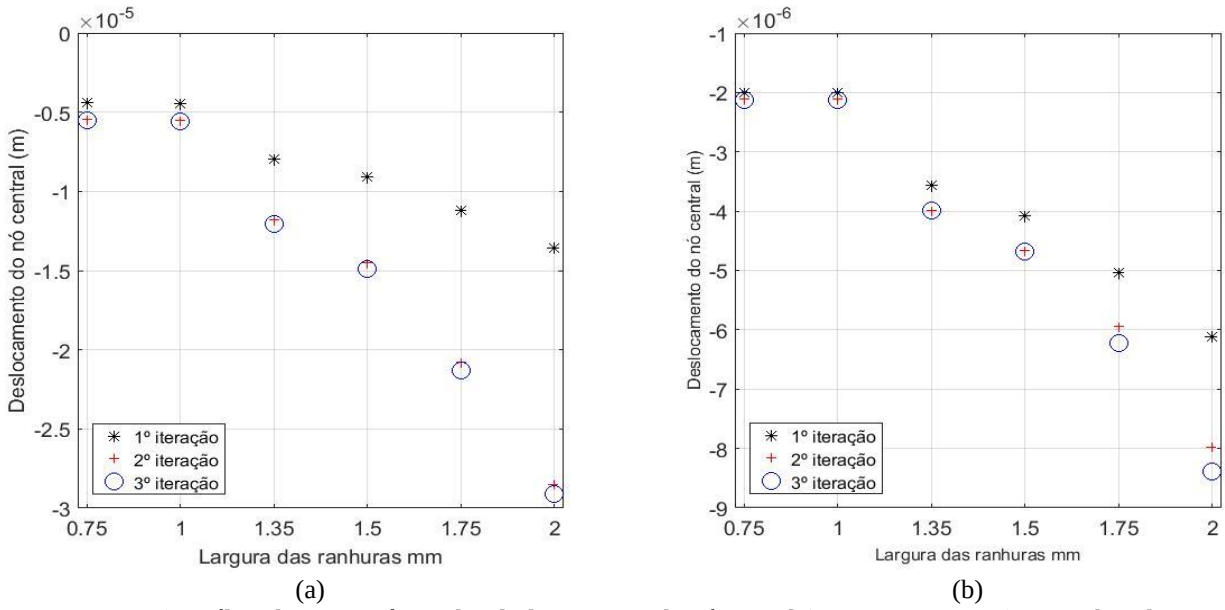


Figura 3. a) Análise de convergência dos deslocamentos do nó central (1º, 2º e 3º iteração), causado pela tensão de polarização DC Para 12µm. b) Para 20µm.

Na análise modal, foram determinados as frequências de ressonância e os modos de vibrar da membrana. A simulação da análise modal foi feita considerando a pré-tensão aplicada na membrana e a distribuição de força encontrada na terceira iteração da análise estática. As frequências de ressonâncias foram utilizadas como referência na análise harmônica. Na análise harmônica, foi determinada a resposta em frequência do transdutor, ou seja, o deslocamento ao longo da membrana para uma dada frequência de excitação. Na simulação, a superfície superior da membrana é submetida a pré-tensão e à distribuição de força encontrada na terceira iteração da análise estática. Em seguida é aplicada novamente a distribuição de força encontrada na terceira iteração da análise estática, mas essa distribuição de força é variável no tempo de acordo com a frequência de excitação. A varredura de frequência é feita ao redor da frequência de ressonância do 1º modo de vibrar obtido na análise modal.

Esse procedimento foi adotado, pois existem duas tensões elétricas atuantes no transdutor, uma tensão contínua DC, que faz a membrana se deslocar de um valor D_{est} e permanecer deformada dentro da cavidade e uma tensão alternada AC, que excita harmonicamente a membrana, fazendo ela deslocar de um valor D_{din} em relação ao deslocamento provocado pela tensão DC, conforme mostrado na Fig. 4(a) e 4(b).

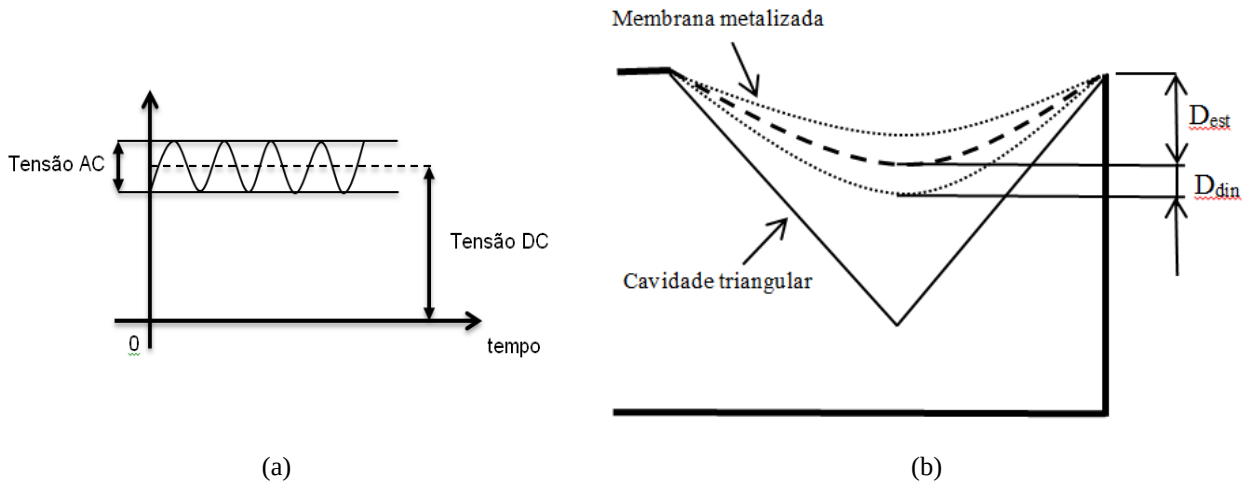


Figura 4. a) Tensões atuantes no transdutor b) Deslocamentos da membrana causados pela tensão DC e AC.

Para o cálculo do campo acústico, foi utilizada a solução numérica da integral de Rayleigh como mostrado em Kinsler (1982). A solução apresentada refere-se a uma excitação harmônica. Os valores da amplitude de pressão $P(\vec{r}_p)$ em cada ponto do campo acústico $\vec{r}_p$ são determinados pela soma das contribuições individuais de cada elemento de área dS_i , discretizado na superfície superior da membrana, conforme Eq. (8).

$$P(\vec{r}_p) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{dS_i d_i}{R_{ip}} e^{j2\pi f R_{ip}/c} \right) \quad (8)$$

onde, R_{ip} é distância de cada elemento de área dS_i do emissor até o ponto do campo acústico $\vec{r}_p$, d_i é o deslocamento de cada ponto do emissor, f é a frequência de operação, c é a velocidade de propagação no meio e N é o número de áreas discretizadas na superfície emissora.

A simulação do campo acústico foi realizada no software MATLAB. Após a discretização da superfície superior da membrana, definindo os elementos de área em cada ponto do emissor, foram carregados os valores de deslocamento dos nós, esse deslocamento é formado pela soma do deslocamento encontrado na análise estática com o da na análise harmônica. Após isso, é realizado o somatório das contribuições individuais de cada elemento i da Eq. (8), determinando o campo acústico.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o intuito de se aferir o modelo, transdutores capacitivos foram construídos. Esses transdutores foram testados nas diversas larguras de ranhuras triangulares definidas ($L_1=0,75$; $L_2=1$; $L_3=1,35$; $L_4=1,50$; $L_5=1,75$ e $L_6=2$ mm), que foram usinadas em placas de alumínio. Durante todo o experimento a membrana foi pré-tensionada utilizando o mecanismo de parafuso com mola. Foram usadas duas espessuras de membrana $12\mu\text{m}$ e $20\mu\text{m}$. O transdutor desmontado com sua membrana se encontra na Fig. 5.

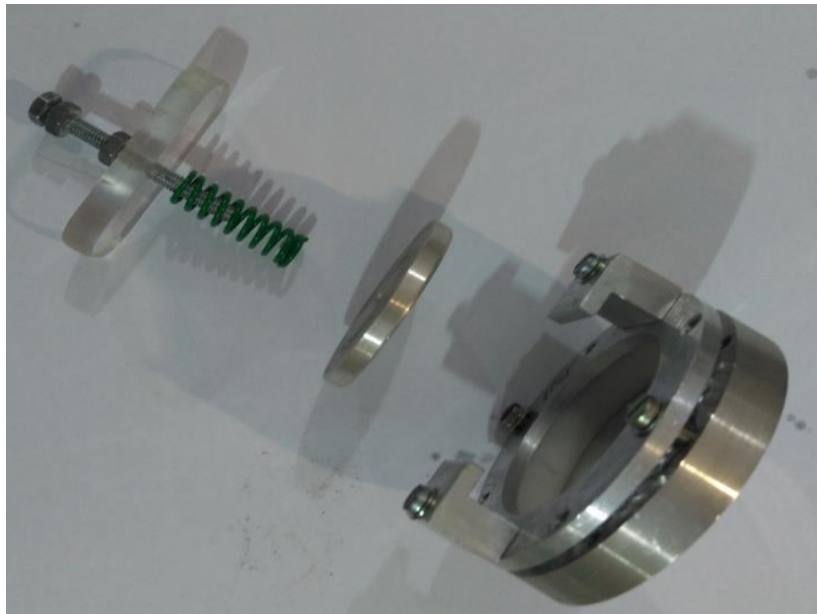


Figura 5. Transdutor capacitivo construído com membrana metalizada fixada.

A verificação experimental consistiu na determinação das frequências de ressonância e dos deslocamentos do centro da membrana dos protótipos. Foi aplicada uma tensão de excitação de 200 VAC em frequências próximas da frequência de ressonância determinada na análise modal, utilizando o gerador de funções programável Tektronix PG 5110 e um amplificador de potência Crown LPS 1500. Em seguida, usando um vibrômetro a laser Polytec com controlador modular OFV-5000 e cabeça óptica OFV-534, ligado a um osciloscópio digital da Hewlett Packard 54112D, determinou-se as frequências de ressonância e os deslocamentos do centro da membrana dos protótipos construídos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados a seguir os resultados simulados das análises eletrostáticas, estática, modal, harmônica e acústica para as seis larguras de ranhura e duas espessuras da membrana empregadas neste trabalho. A Fig. 6(a) e Fig. 6(b) mostram os resultados da análise eletrostática, respectivamente para a borda e para o centro considerando o nó do centro e da borda da membrana. Os valores de forças aumentam muito nas bordas, onde a membrana está em contato com o ápice da ranhura triangular. Além disso, as forças diminuem com o aumento da espessura da membrana e a força do centro também diminui com o aumento da largura da ranhura. Assim, quando menor for a profundidade H da ranhura, maiores serão as forças atuantes.

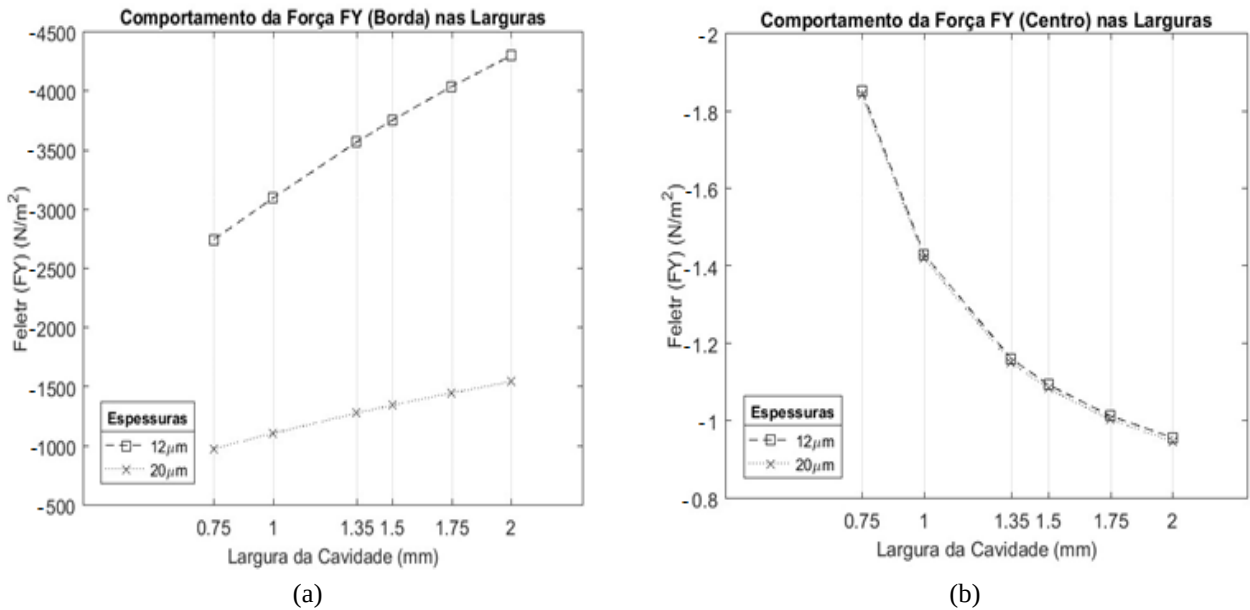


Figura 6. a) Valores de força FY para borda b) Valores de força FY para o centro.

A Fig. 7 mostra os deslocamentos dos nós localizados na parte superior da membrana resultante da terceira iteração da análise estática. O aumento da largura da ranhura provoca o aumento do deslocamento dos nós na membrana devido ao aumento da força eletrostática. Se diminuir a espessura da membrana, mantendo constante a largura da ranhura, o deslocamento também aumenta.

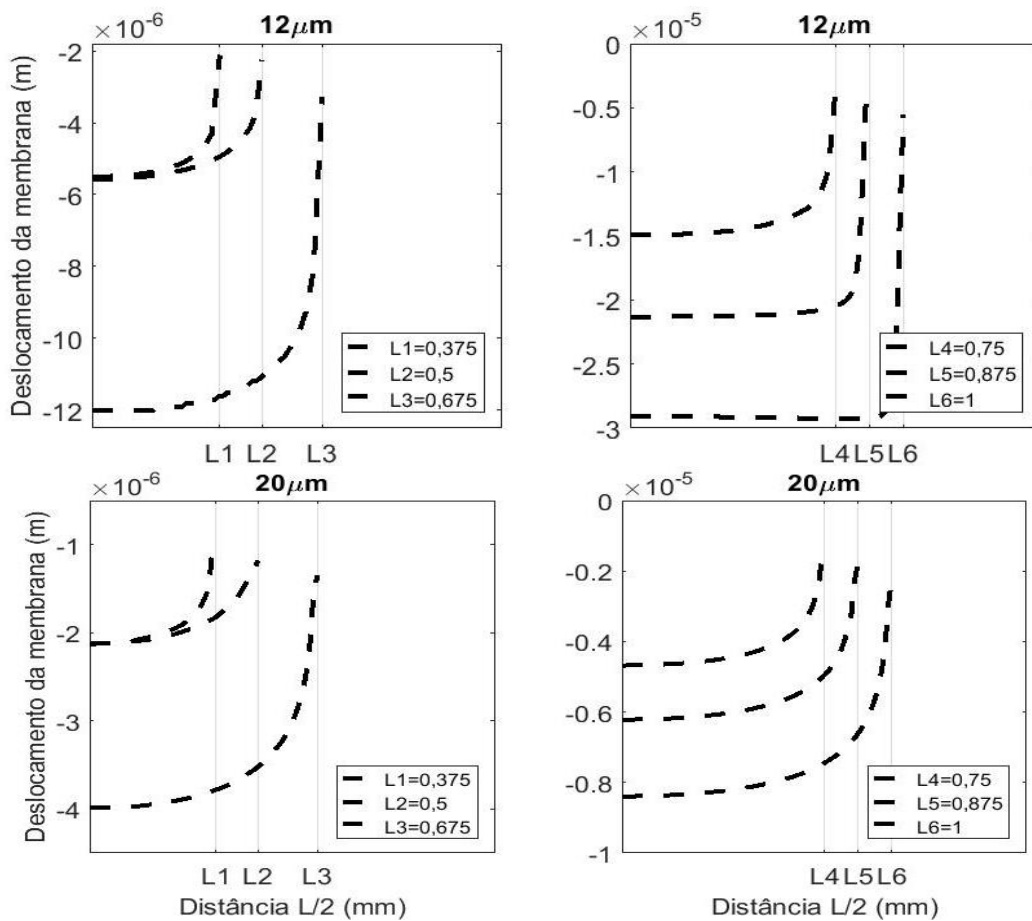


Figura 7. Perfis de deslocamento da membrana. Para todas as medidas e para os dois valores de espessuras.

Na análise modal, foram obtidas as frequências de ressonância do primeiro modo de vibrar em função da largura de ranhura para as espessuras da membrana de 12 μm e 20 μm, conforme mostra a Fig. 8. Percebe-se uma redução no valor da primeira frequência de ressonância, conforme a largura é aumentada. Em relação ao aumento da espessura da membrana, há também uma redução na frequência de ressonância, pois ocorre aumento da massa da membrana.

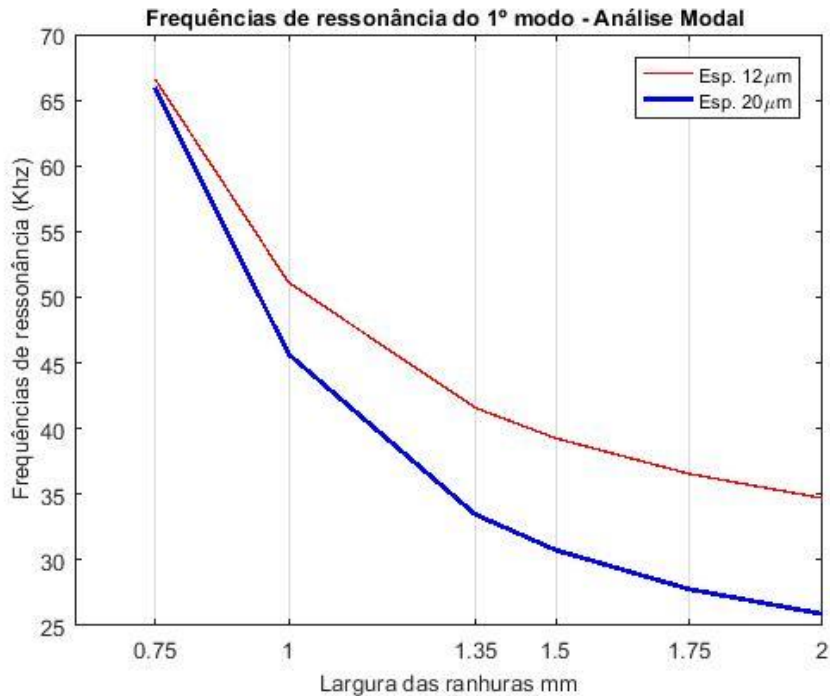


Figura 8. Frequências de ressonância no 1º modo de vibrar.

Na análise harmônica, a Fig. 9 mostra as amplitudes de deslocamento do nó central, excitando o primeiro modo de ressonância de cada geometria. O deslocamento aumenta com o aumento da largura da cavidade, devido ao maior valor da força eletrostática resultante na membrana. Por outro lado, o deslocamento diminui com o aumento da espessura, já que ocorre um aumento da massa da membrana.

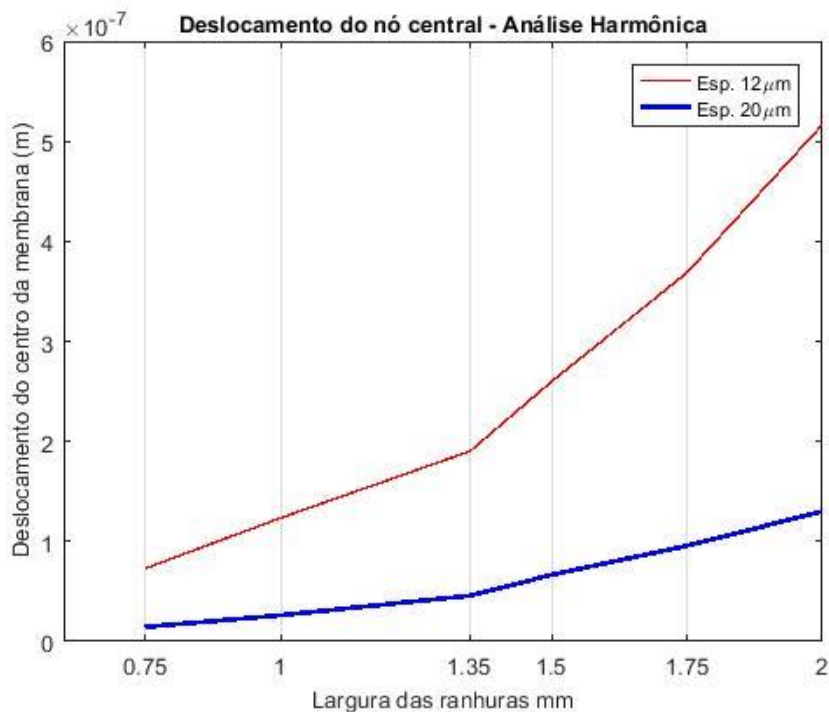


Figura 9. Deslocamentos do nó central da membrana devido à excitação do 1º modo de ressonância.

A Tab. 1 mostra os valores das frequências de ressonância e os deslocamentos do centro da membrana obtidos experimentalmente considerando a excitação harmônica de 200 V AC. Os valores experimentais se encontram muito próximos aos valores simulados, conforme mostra a Tab. 1. Os erros encontrados se relacionam ao ajuste da pré-tensão, pois o modelo é muito sensível à mesma, conforme pode ser verificado nas Figs. 10 e 11.

Tabela 1. Medições experimentais das frequências de ressonância e dos deslocamentos

Larguras (mm)	Esp. (μm)	Valores experimentais		Valores simulados		Erro (%) Freq.	Erro (%) Desloc.
		Freq.(KHz)	Desloc (m)	Freq.(KHz)	Desloc (m)		
L1=0,75	12	66,7	8,40E-08	66,6	7,28E-08	0,2%	15,3%
	20	65,3	1,66E-08	65,9	1,45E-08	0,9%	14,2%
L2=1,00	12	49,3	1,42E-07	51,1	1,23E-07	3,5%	15,1%
	20	45,3	2,99E-08	45,6	2,62E-08	0,7%	14,0%
L3=1,35	12	41,5	2,15E-07	41,5	1,90E-07	0,0%	12,9%
	20	33,1	5,20E-08	33,4	4,58E-08	0,9%	13,6%
L4=1,50	12	39,3	2,92E-07	39,2	2,60E-07	0,3%	12,3%
	20	30,2	7,33E-08	30,7	6,66E-08	1,6%	10,1%
L5=1,75	12	35,9	4,12E-07	36,5	3,69E-07	1,6%	11,9%
	20	27,2	1,05E-07	27,7	9,56E-08	1,8%	10,0%
L6=2,00	12	33,6	5,76E-07	34,7	5,17E-07	3,2%	11,5%
	20	26,1	1,43E-07	25,8	1,30E-07	1,2%	10,0%

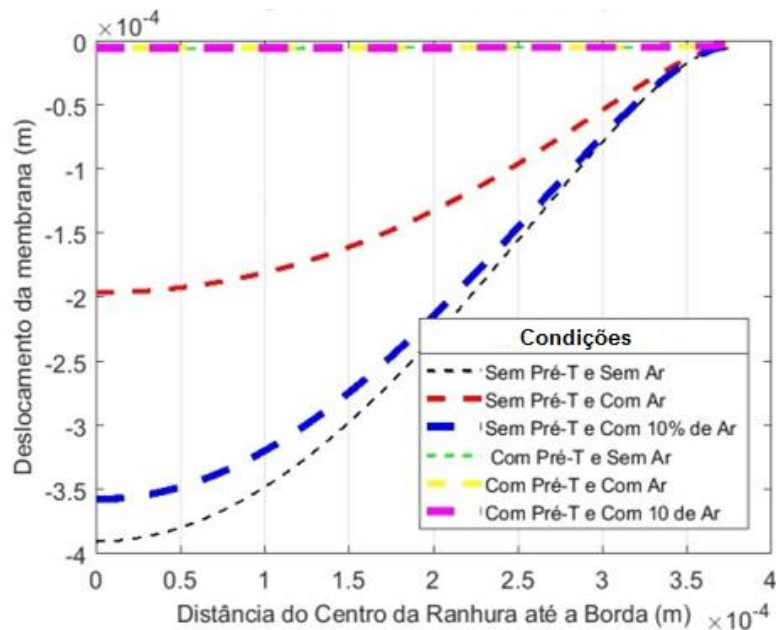


Figura 10. Perfil dos deslocamentos simulados da membrana para L= 0,75mm, E=12μm para todas as condições.

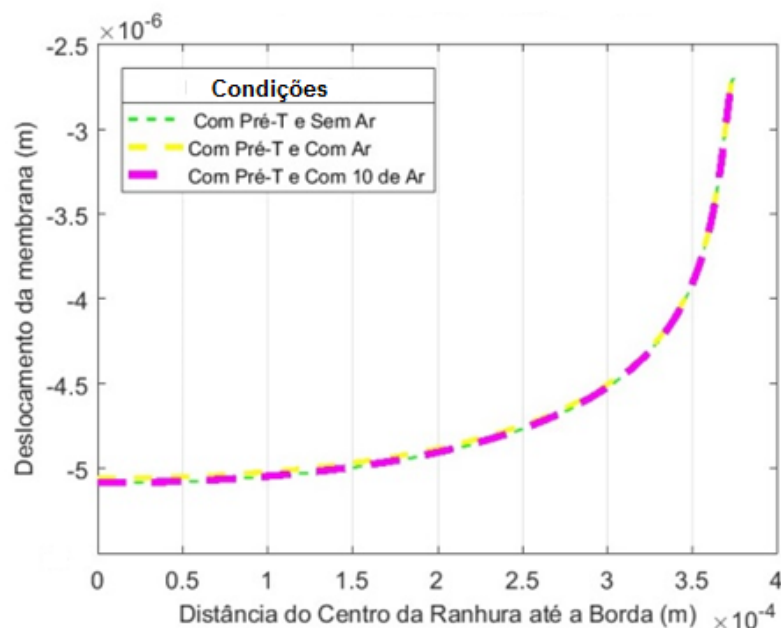


Figura 11. Perfil dos deslocamentos simulados da membrana para L= 0,75mm, E=12μm para condição Pré-Tensão.

A Fig. 12 mostra a distribuição dos deslocamentos, formado pela soma dos deslocamentos estáticos e dinâmicos, ao longo do raio do transdutor (20mm) para todas as ranhuras concêntricas, com dimensões $L/2 = H = 0,375$ mm, e para a membrana de espessura $E = 12$ μm . Com os valores de deslocamentos, determinou-se o campo acústico gerado pelo transdutor, ao longo do plano XZ para uma excitação harmônica com frequência 66,6 KHz. O transdutor se encontra posicionado no plano XY, como mostra a Fig. 13.

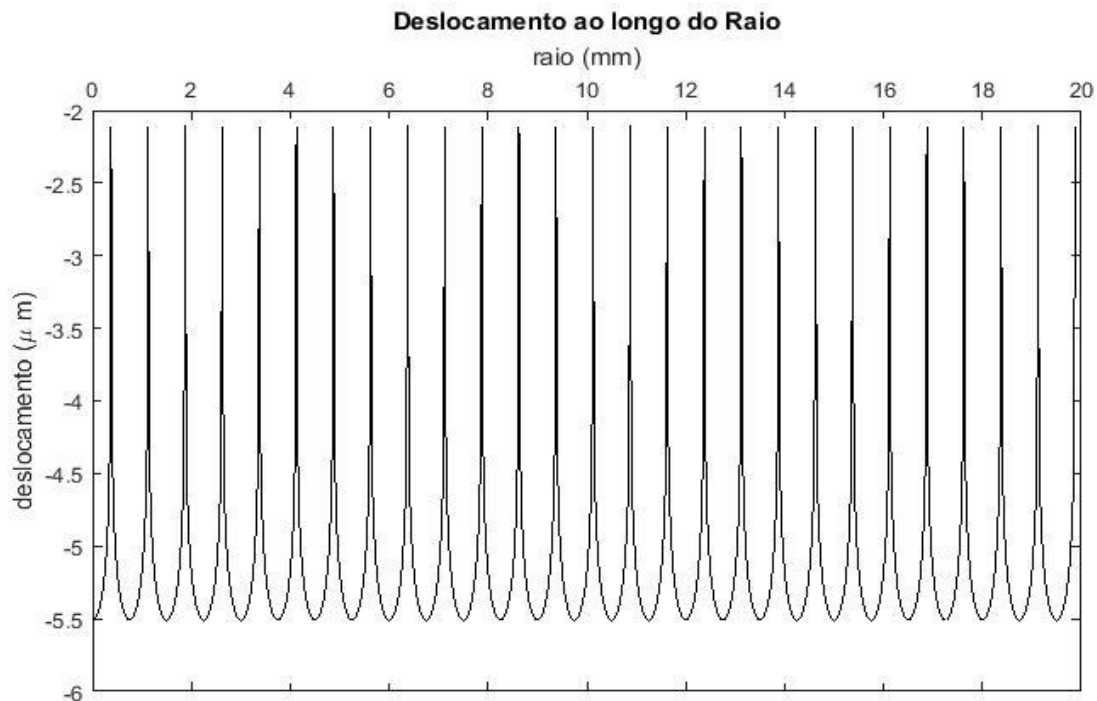


Figura 12. Deslocamentos ao longo do raio da membrana superior, considerando $L/2=0,375\text{mm}$ e $E=12\mu\text{m}$.

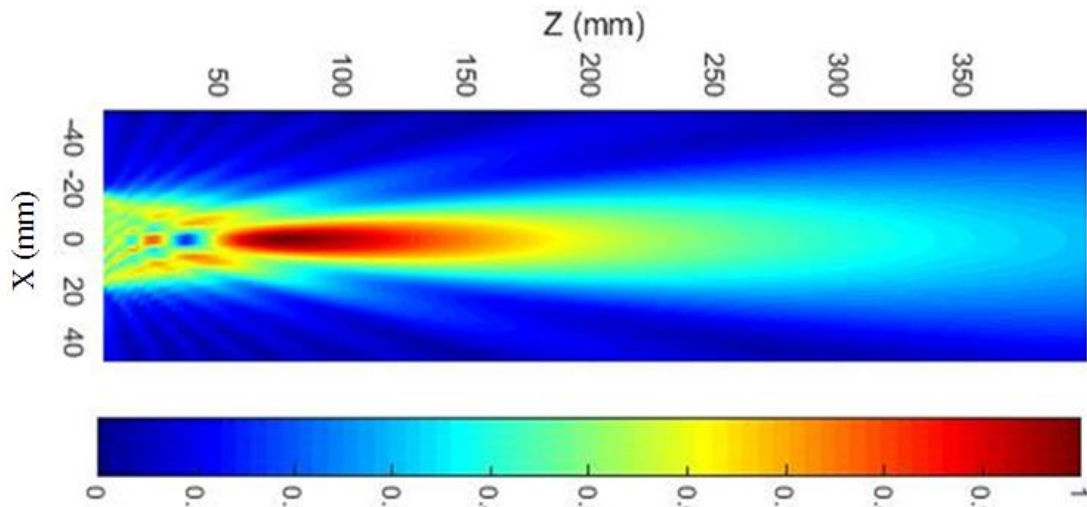


Figura 13. Campo Acústico simulado ($L=0,75$, $E=12\mu\text{m}$ e frequência de excitação 66,6 KHz), considerando o plano XZ.

6. CONCLUSÃO

A modelagem mostrou-se muito robusta com relação à determinação dos parâmetros de projeto (frequência de ressonância, deslocamento da membrana) quando comparado aos valores experimentais. Há uma grande influência na vibração dinâmica da membrana devido à aplicação da pré-tensão na membrana e à presença do ar na cavidade. Verificou-se que a frequência de ressonância diminui e o deslocamento aumenta com o aumento da largura das ranhuras triangulares. Já com a diminuição da espessura de membrana, observou-se o aumento dos seguintes parâmetros: frequência de ressonância e deslocamento. Para próximos passos, serão realizados experimentos com os protótipos para validação dos valores de pressão acústica determinados na simulação.

7. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (processo nº 2017/13094-4) pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

8. REFERÊNCIAS

- Adamoswki, J.C., Silva, E.C.N., Simon, C., Buiochi, F. and Higuti, R.T., 1994, "Finite Element Modeling of an Ultrasonic Capacitive Transducer", IEEE International Ultrasonics Symposium, pp. 1261-1264.
- Ansys, 1994, "ANSYS User's Manual: Theory, Vol. IV, Swanson Analysis Systems, Inc".
- Bathe, K.J., 1982 "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Furukawa, C. M; Adamowsk, J. C.; Moscato, L.A. 1993, "Navegação de um Veículo Autônomo por Ultra-Som em Ambientes Estruturados", Revista de Ciências Mecânicas, ABCM, v. XV, n. 3, São Paulo, Brasil, p.286-301.
- Grandia, W.A., Fortunko, C.M, 1995, "NDE Applications of Air-Coupled Ultrasonic Transducers", IEEE Ultrasonics Symposium, p. 697-709.
- Haller, M. I., Khuri-Yakub, B. T., 1994, "A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer", IEEE Ultrasonics Symposium, p. 1241-1244.
- Hayward, G., 1997, "Air Coupled NDE - Constraints and Solutions for Industrial Implementation", IEEE Ultrasonics Symposium, p. 697-709.
- Kinsler, L.E., Coppers, A.B., Frey, A.R. and Sanders, J.V., 1982, "Fundamentals of Acoustics, 3^o edition, John Wiley & Sons, New York.
- Mattila, P., Tsuzuki, F., Vaataja, H., and Sasaki, K., 1995, "Electroacoustic Model for Electrostatic Transducers with V-Grooved Backplates, IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, v.42, n.1, p.1-7.
- Wygant, I.O., Kupnik, M, Wochner, M.S., 2008, "The Design and Characterization of Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUTs) for Generating High-Intensity Ultrasound for Transmission of Directional Audio", IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MODELING BY FINITE ELEMENTS OF CAPACITIVE ULTRASONIC TRANSDUCERS WITH TRIANGULAR CAVITY

Manlius Caesar Torquato dos Santos Rocha, manlius@usp.br¹

Flávio Buiochi, fbuiochi@usp.br¹

¹ Department of Mechatronics and Mechanical Engineering, University of São Paulo, Avenue Prof. Mello Moraes 2231, São Paulo, Brazil, Zip Code: 05508-030..

Abstract. This work presents the finite element modeling of capacitive ultrasonic transducers operating in emission using ANSYS software. It is also used MATLAB software in the implementation of routines to analyze the results and to simulate the acoustic field generated by the transducer. The modeling provides for the determination of the design parameters (resonance frequency, membrane displacement). The transducer model was represented by two means: the air present in the wells (grooves) with triangular geometry and the polyester membrane. Two electrostatic force distributions along the membrane were performed for two membrane thicknesses (12 and 20 μm) and six groove widths between 0.75 and 2 mm, and static mechanical analyzes were performed to verify membrane deformation due to electrostatic force. Modal and harmonic analyzes were also performed to obtain, respectively, the resonance frequencies and the frequency response. The mechanical pre-tension applied to the membrane was considered in the model. The model and the results of the simulations and experimental testes are presented.

Keywords: Transducer, ultrasound, finite element analysis, air emission.

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.