

DETECÇÃO ÓPTICA DE UM SENSOR DE PRESSÃO MICROELETROMECHANICO

MARCELO BARIATTO ANDRADE FONTES¹

¹Fatec de São Paulo - Departamento de Sistemas Eletrônicos
marcelo.bariatto@fatec.sp.gov.br

Optical Detection of a Microelectromechanical Pressure Sensor

Eixo Tecnológico: *Controle e Processos Industriais*

Resumo

A tecnologia de Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) consiste na fabricação de sensores, atuadores e transdutores na escala micrométrica, apresentado baixo tempo de resposta, valores confiáveis, alta sensibilidade e baixo custo de fabricação. Os microssores de pressão possuem uma ampla gama de aplicações em diversas áreas, englobando desde a indústria automotiva e processos de produção e equipamentos médicos. O microssores de pressão desenvolvido em projetos anteriores, é baseado em piezoresistores difundidos sobre uma membrana de silício, obtida pelo processo de corrosão anisotrópica do silício em KOH (hidróxido de potássio). A resposta padrão do microssores é elétrica, sendo obtida por meio de um circuito em ponte de Wheatstone, no qual a diferença de potencial é função da variação de resistência dos piezoresistores submetidos à pressão. Este trabalho tem como foco a determinação direta da deflexão da membrana sob pressão, através de medidas ópticas, utilizando a técnica interferométrica de Michelson, obtendo-se assim uma curva de calibração (deformação de membrana x pressão). Os resultados experimentais foram comparados com valores teóricos e simulados através do simulador multifísico COMSOL[®]. Os resultados ópticos indicaram uma relação linear entre a deformação da membrana e a pressão medida, resultando em 3,61 $\mu\text{m}/\text{bar}$. Modelos teóricos e simulados sugerem que o engastamento do sensor se aproxima da média entre o engastamento livre e o totalmente engastado.

Palavras-chave: *Instrumentação para sensores, interferometria óptica, sistemas microeletromecânicos (MEMS), microssores de pressão.*

Abstract

Microelectromechanical Systems (MEMS) technology consists of manufacturing sensors, actuators and transducers on the micrometer scale, with low response times, reliable values, high sensitivity and low manufacturing costs. Pressure microsensors have a wide range of applications in various areas, from the automotive industry to production processes and medical equipment. The pressure microsensors developed in previous projects is based on piezoresistors diffused over a silicon membrane, obtained by the process of anisotropic corrosion of silicon in KOH (potassium hydroxide). The standard response of the microsensors is electrical and is obtained by means of a Wheatstone bridge circuit, in which the potential difference is a function of the variation in resistance of the piezoresistors subjected to pressure. This work focuses on the direct determination of membrane deflection under pressure, through optical measurements, using Michelson's interferometric technique, thus obtaining a calibration curve (membrane deflection x pressure). The experimental results were compared with theoretical values and simulated using the COMSOL[®] multiphysics simulator. The optical results indicated a linear relationship between the deformation of the membrane and the measured pressure, resulting in 3.61 $\mu\text{m}/\text{bar}$. Theoretical and simulated models suggest that the sensor's crimping is close to the average between free and fully crimped.

Key-words: *Instrumentation for sensors, optical interferometry, microelectromechanical systems (MEMS), pressure microsensors.*

1. Introdução

A tecnologia empregada na construção de Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos (MEMS) é de natureza multidisciplinar, uma combinação de conceitos da microeletrônica, engenharia mecânica, ciência dos materiais, física e química, reunidos para produzir sistemas integrados em um único chip, gerando dispositivos capazes de desempenhar funções de sensoriamento, controle e atuação, possuindo vantagens de produção em larga escala, baixo custo de fabricação, elevada reprodutibilidade, confiabilidade e baixo tempo de resposta [1].

Desenvolvida a partir dos anos 80, esta tecnologia vem apresentando rápida evolução em virtude da vasta gama de possíveis aplicações, sendo considerada uma das tecnologias mais promissoras do século XXI [2].

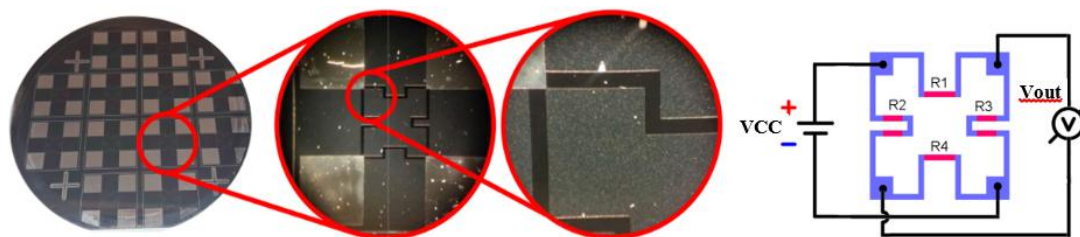
Os microssensores de pressão possuem uma ampla gama de aplicações em diversas áreas, englobando desde a indústria automotiva e processos de produção e equipamentos médicos [3].

Existem diversos tipos de sensores que realizam a transdução mecânica necessária para a medição da pressão, baseadas nos efeitos de piezoresistividade, piezoeletricidade, capacitância variável, ópticos e ressonantes [4].

O microssensor desenvolvido é baseado na utilização de 4 piezoresistores de silício tipo n, difundidos sobre uma membrana de silício tipo p com 5 mm de lado, obtida pelo processo MEMS, possuindo dimensão quadrada de 15 mm de lado, contatos de alumínio de 5 mm e piezoresistores com largura de linha de 250 μm , onde em uma lâmina de silício (100) com 7,5 cm de diâmetro foram fabricados 12 microssensores [5], Fig. 1. A resposta elétrica padrão do microssensor (V_{out}), obtida pelo circuito em ponte de Wheatstone, é descrita pela Eq. (1).

$$V_{out} = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_1} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \cdot VCC \quad (1)$$

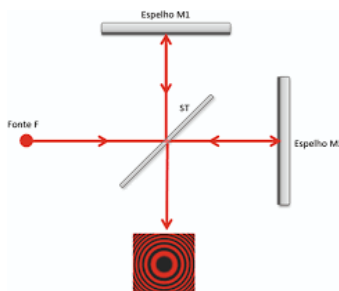
Fig. 1 - Imagens da lâmina de silício contendo microssensores fabricados e o circuito em ponte de Wheatstone utilizado para sua caracterização elétrica.



Fonte: (Sanches, 2019).

Um método de detecção, diferente do elétrico, que foi explorado neste projeto refere-se à determinação direta da deflexão da membrana através de medidas ópticas, utilizando a técnica interferométrica de Michelson [6-8], Fig 2. Neste projeto foi utilizado um laser de comprimento de onda de 632,8 nm, incidindo no centro da membrana do sensor de pressão, é possível então medir-se deslocamentos de $\lambda/2$ ou 316 nm na deflexão da membrana. Assim através da movimentação das franjas associadas a deflexão da membrana do sensor devida à aplicação de pressão, obtém-se a calibração deslocamento x pressão. Foi também utilizado outro laser de comprimento de 655 nm, para comparação. Os resultados experimentais foram comparados com valores teóricos e simulados através do simulador multifísico COMSOL® [9].

Fig. 2. Desenho esquemático do método de medida por interferometria de Michelson.

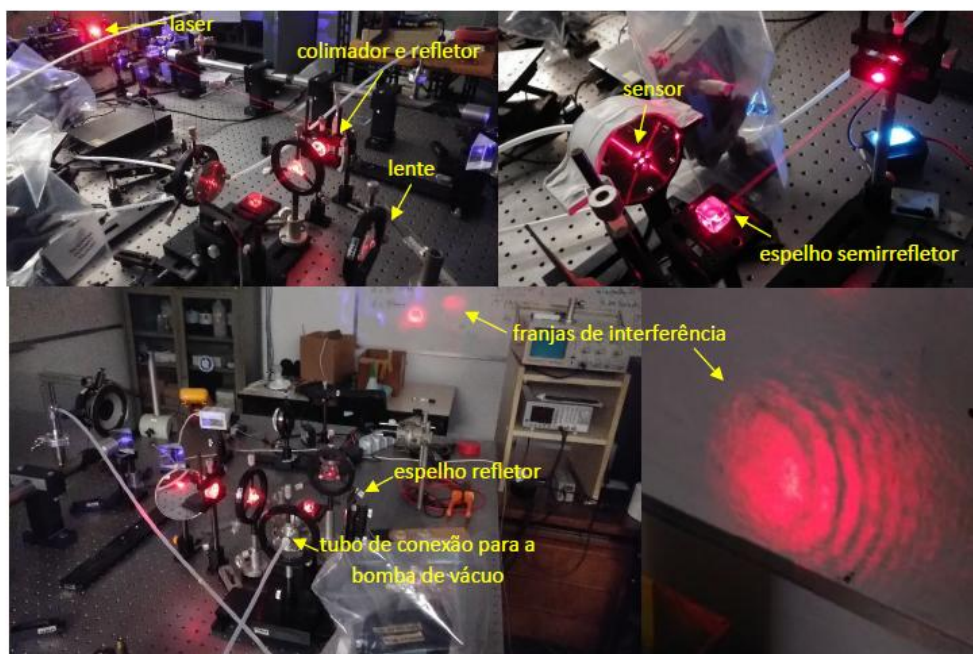


Fonte: (Wikipedia, 2024)

2. Materiais e métodos

Na detecção pela técnica óptica, um suporte rígido para o sensor é fundamental para proporcionar a estabilidade, pois somente a deflexão da membrana do sensor é quem deve alterar o caminho óptico, assim foi utilizada uma flange metálica que possui um furo central na região posterior onde um tubo polyflow é conectado em uma bomba de vácuo, sendo o sensor fixado com graxa de silicone na face posterior. O aparato de medida óptica por interferométrica de Michelson, devido a necessidade de estabilidade mecânica, foi realizado no Laboratório de Óptica Aplicada (LOA) da FATEC-SP, Fig.3, que possui uma mesa óptica com amortecedores. O aparato de medida é composto pela base metálica na qual a luz do laser reflete na região central do sensor onde localiza-se a membrana, pelo espelho semirrefletor e pelo segundo espelho, sendo a imagem da interferência projetada em uma lente para visualização ampliada ou em uma câmera CCD, para análise das franjas de interferência de maneira automática, possibilitando relacioná-las com as o deslocamento da membrana do sensor.

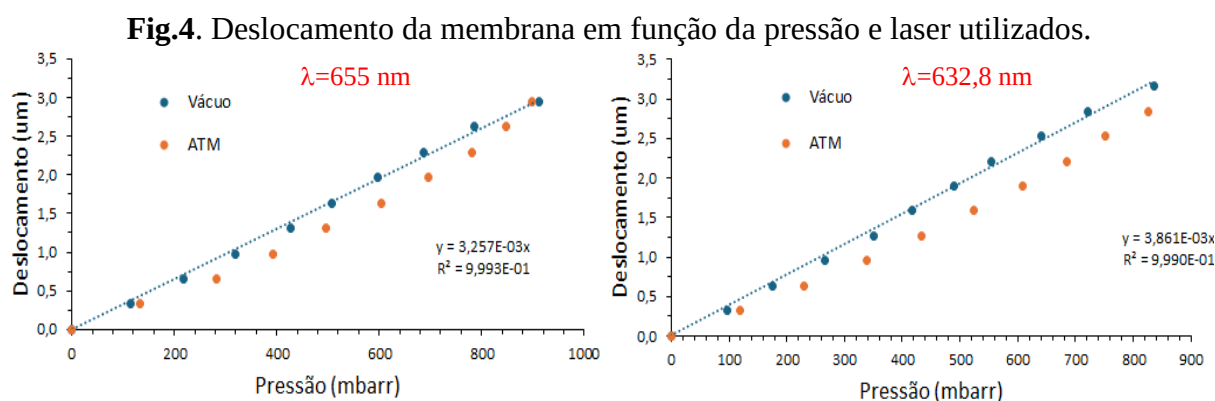
Fig. 3. Arranjo experimental para as medidas ópticas de interferometria Michelson.



Fonte: (Autor, 2025).

3. Resultados e Discussão

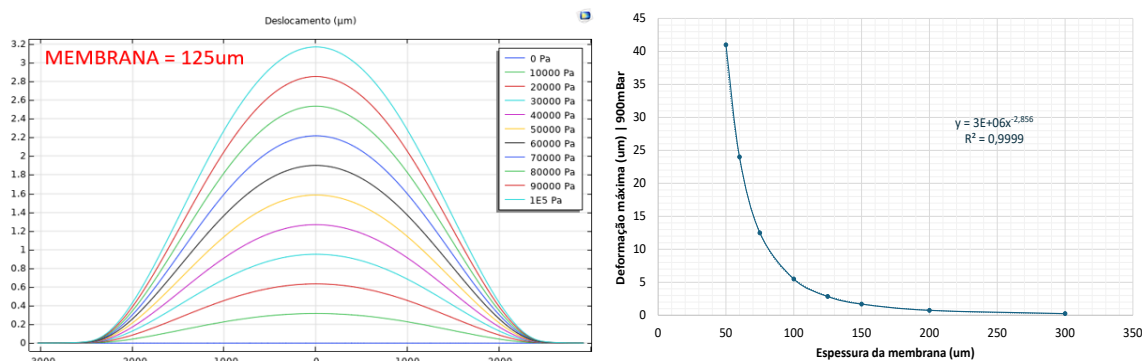
Foram realizados diversos experimentos associando a variação do deslocamento da membrana do sensor, medida opticamente em sua região central, com a pressão medida. Foram utilizadas duas fontes de luz (laser) com comprimento de onda de 655 nm e 632,8 nm. As medidas foram realizadas em ciclos de bombeamento, descritos como “Vácuo” e ciclos de retorno a pressão atmosférica, descritos como “ATM”, Fig 4. Nota-se uma variação linear do deslocamento da membrana com a pressão, mais acentuado durante o bombeamento. Uma possível explicação decorre nas distintas velocidades de variação da pressão quando na abertura para atmosfera, que pode gerar uma histerese mecânica na membrana. Nos dois casos a linearidade apresentou valores R^2 muito próximo da unidade. Outra observação refere-se a máxima deflexão obtida, que foi de 2,948 μm para $\lambda=655$ nm 3,164 μm para $\lambda=632,8$ nm. Portanto para uma diferença de pressão de 900 mbar, o deslocamento medido da membrana foi aproximadamente 3 μm .



Fonte: (Autor, 2025).

Utilizando o programa multifísico Comsol[®], foram simuladas as deflexões na região central da membrana em função da pressão aplicada, para diversas espessuras de membrana, Fig. 5. Analisando os valores da máxima deflexão para uma variação de 900 mbar em função da espessura da membrana, verificou-se um comportamento próximo de x^{-3} . Para uma deflexão obtida experimentalmente nas medidas por interferometria de aproximadamente 3 μm , a espessura da membrana corresponderia a 126 μm .

Fig. 5. Simulação da deflexão na região central da membrana em função da pressão (direita) e a deflexão máxima para 900 mbar em função da espessura da membrana (esquerda)

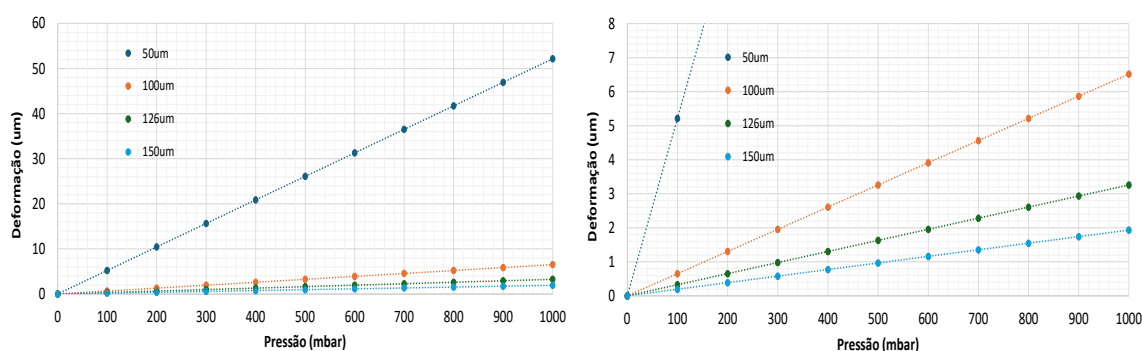


Fonte: (Autor, 2025).

Através da análise teórica de placas engastadas [10,11], relaciona-se a máxima deflexão ($y_{\max}$) em função da pressão aplicada (q), espessura da membrana (t) e largura da membrana quadrada (b), pode-se notar que a máxima deflexão depende linearmente com a pressão e inversamente ao cubo da espessura, Eq. (2). Através da expressão teórica, pode-se obter os resultados indicados na Fig. 6. Onde: E corresponde ao módulo de elasticidade do silício ($E=1,8.10^{11} \text{ N/m}^2$) e $\alpha=0,0138$ é uma constante, para uma placa totalmente engastada.

$$y_{\max} = \frac{\alpha q b^4}{E t^3} \quad (2)$$

Fig.6. Análise teórica da deflexão máxima na região central da membrana do sensor para diversas pressões aplicadas e para diversas espessuras de membrana, ampliada a direita.

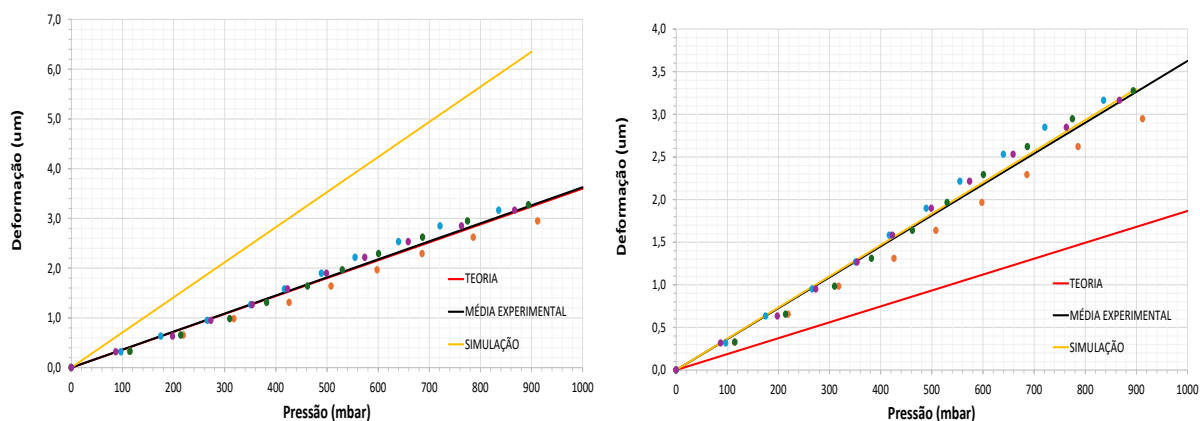


Fonte: (Autor, 2025).

Ao comparar os resultados experimentais para a deflexão máxima, com os valores teóricos e simulados, não há uma coincidência, ou seja, para se obter 3 μm experimentais, a teoria indica uma espessura de membrana de cerca de 103 μm e a simulação 128 μm .

Para espessura de membrana de 97 μm , há uma coincidência entre os valores teóricos e a média de todos os valores experimentais, porém os resultados simulados ficam superestimados e para espessura de membrana de 122 μm , há uma coincidência entre os valores simulados e a média de todos os valores experimentais, porém os resultados teóricos ficam subestimados, Fig.7.

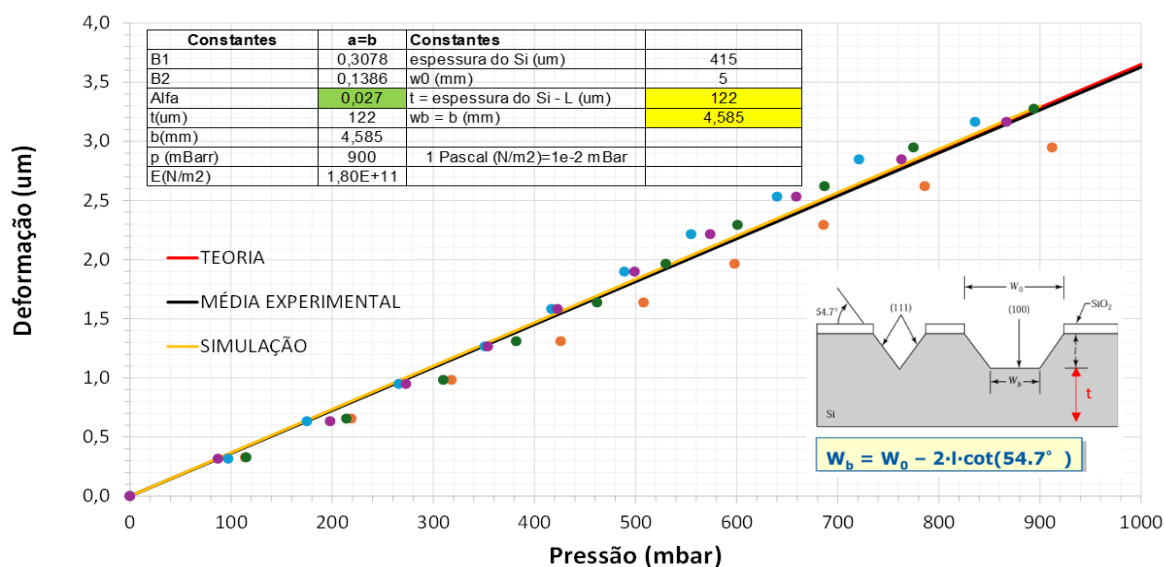
Fig. 7. Comparações dos resultados teóricos, experimentais e simulados, para a deflexão da membrana em função da pressão, para espessura de 97 μm (esquerda) e 122 μm (direita).



Fonte: (Autor, 2025).

Considerando que o sensor foi fixado com graxa de silicone, que não define um engastamento rígido, logo encontra-se em uma situação intermediária entre totalmente engastado e totalmente livre, optou-se por verificar que valor do parâmetro α forneceria uma convergência entre os valores teóricos, experimentais e simulados. O valor que possibilitou a convergência foi $\alpha=0,027$, Fig.8. Considerando os valores da placa totalmente engastada ($\alpha=0,0138$) e o totalmente livre ($\alpha=0,0444$), e calculando a média temos $\alpha=0,0291$, pode-se associar que o sensor estaria próximo do valor médio de engastamento.

Fig. 8. Comparações nos resultados teóricos, experimentais e simulados, obtidos da deflexão da membrana em função da pressão, para espessura de 122 μm e $\alpha=0,027$.



Fonte: (Autor, 2025).

4. Conclusões

Neste trabalho foi realizada a determinação direta da deflexão da membrana, em função da pressão aplicada, através de medidas ópticas por interferometria de Michelson em um micros sensor de pressão fabricado pela tecnologia MEMS. O micros sensor de pressão é baseado em piezoresistores difundidos sobre uma membrana de silício, obtida pelo processo de corrosão anisotrópica do silício em KOH (hidróxido de potássio), cuja padrão de medida é a resposta elétrica obtida por meio de um circuito em ponte de Wheatstone, no qual a diferença de potencial (V_{out}) é função da variação de resistência dos piezoresistores submetidos à pressão.

Os resultados obtidos por interferometria de Michelson, utilizando lasers de comprimentos de onda $\lambda=655$ nm e 632,8 nm, apresentaram deflexão da membrana linear com a pressão, na região de 900 mbar. Verificou-se uma histerese nas medidas que podem estar associadas as distintas velocidades de variação da pressão aplicadas. A deflexão máxima observada foi de aproximadamente 3 μm . Considerando todos os resultados ópticos, obteve-se uma variação de 3,61 $\mu\text{m}/\text{bar}$.

Análises utilizando o simulador multifísico Comsol® indicaram que a deflexão máxima da membrana é inversamente proporcional ao cubo (2,85) da espessura da membrana, compatível com o sugerido teoricamente.

Os resultados comparativos das medidas experimentais com as simuladas e teóricas, indicam que a membrana possui uma espessura de 122 μm e 4,58 mm de lado e sugerem que o engastamento do sensor aproxima-se da média entre o engastamento livre e o totalmente engastado.

Estes resultados promissores possibilitam que o microsensor de pressão desenvolvido possa ser avaliado simultaneamente por medidas elétrica e ópticas expandido sua utilidade e aplicação.

Agradecimentos

Ao Prof. Eduardo Acedo Barbosa pela utilização e medidas na infraestrutura do Laboratório de Óptica Aplicada (LOA), ao Prof. Francisco Tadeu Degasperi pela e medidas utilização e medidas na infraestrutura do Laboratório de Tecnologia do Vácuo, ambos da Faculdade de Tecnologia de São Paulo e ao Prof. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti da Engenharia Civil, EPUSP.

Referências

- [1] Madou, M.; **Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology**, Third Edition, Volume One, Two and Three, CRC Press, 2011.
- [2] N. Maluf and K. Williams “**An Introduction to MEMS Engineering**”, Artech House, Inc. 2a Ed. 2004.
- [3] Coraucci, G.O., “**Sensor de Pressão Microeletrônico Baseado no Efeito Piezoresistivo Transversal em Silício**” Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- [4] Benedict, R. P., **Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements**, 3ª ed., J. Wiley, New York, 1984.
- [5] Sanches, K. F.; et al. **Desenvolvimento de um Microsensor de Pressão Microeletromecânico**. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, v. 47, p. 17-22, 2019.
- [6] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Interferometria>, acessado em 21/08/2024.
- [7] Carvalho, P. R. B.; **Construção e Caracterização de um Atuador Piezocerâmico**, , Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Faculdade de Tecnologia de São Paulo, p. 74, 2006.
- [8] Santos, J. B. S. et al. Gas mixture analysis by temperature-independent, multi-wavelength refractive mixing rules. **The Journal of Chemical Thermodynamics**, p. 107473, 2025.
- [9] <https://www.comsol.com/>, acessado em 5/04/2024.
- [10] Fraga, M. A. et al., **Método analítico para dimensionamento do diafragma de um sensor de pressão piezoresistivo**. Universidade de São Paulo – USP. 2014
- [11] Young, W. C.; Budynas, R. G.; Sadegh, A. M. **Roark's formulas for stress and strain**. McGraw-Hill Education, 2012.