

# Computational Simulation for Square Diaphragms of a Piezoresistive Pressure Sensor

R. Gabbi, L. Rasia, A. Valdiero, and M. Gabbi

**Abstract**—This paper presents a methodology for analytical computation and computational simulation using the finite element method - FEM for a piezoresistive sensor element in flexible polymer substrate A4 paper type. The computational simulation aims to find the region of greatest mechanical stress of the clamped square diaphragm set in the four sides, when a pressure is applied. The steps for the simulation are the definition of the geometry, generation of the mesh, inclusion of the properties of the material and execution of the simulation. The mathematical modeling of maximum mechanical stress is described analytically and computationally using ANSYS software. The analytical calculations were compared with the computational simulation and presented a relative percentage error of 13.61% for the maximum mechanical stress. In this work, it is verified that the piezoresistor should be positioned in the middle of the diaphragm edges  $a/b = 1$  to take advantage of the maximum mechanical stress curves. The result is extremely important and will define the best location for deposition of graphite films in future fabrications of sensor elements.

**Index Terms**—Computer simulation, Numerical simulation, Piezoresistive devices, Pressure sensors.

## I. INTRODUÇÃO

OS AVANÇOS na eletrônica flexível e adaptativa foram significativos nos últimos dez anos. Surgem inúmeras novas aplicações, a partir de produtos eletrônicos, que podem dobrar-se e adaptar-se às formas 3D. Por exemplo, dispositivos médicos (implantes de retina, marca-passos e próteses), roupas inteligentes, displays flexíveis e robótica [1].

Portanto, dispositivos do tipo micro sensores são vantajosos, pois estes possuem estrutura compacta, facilidade na integração, baixo custo, pequena perda de potência, alta velocidade de resposta aos sinais e alta precisão. Estes dispositivos são especialmente adequados para os campos de aplicação como a aviação, navegação espacial, armas, automóvel, engenharia biológica e tratamento médico [2].

Artigo enviado para revisão em 10 de Julho de 2017.

R. Gabbi, Instituto Federal Farroupilha *Campus* Panambi, Panambi, CEP 98280-000 Brasil e Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, CEP 98700-000 Brasil (e-mail: renan.gabbi@iffarroupilha.edu.br).

L. A. Rasia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, CEP 98700-000 Brasil (e-mail: rasia@unijui.edu.br).

A. C. Valdiero, foi da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, CEP 98280-000 Brasil (e-mail: antoniocvaldiero@gmail.com).

M. T. T. Gabbi, Universidade Federal de Santa Maria, Campus Palmeira das Missões, Palmeira das Missões, CEP 98300-000 Brasil (e-mail: maiaratolfo@gmail.com).

Sistemas micro-eleto-mecânicos (MEMS), tais como: sensores de força, sensores de pressão, sensores de tensão, microfones, acelerômetros e sensores de temperatura são comumente construídos usando o efeito da piezoresistividade.

A piezoresistividade é uma propriedade intrínseca do material, a qual altera a resistividade elétrica quando uma massa (carga mecânica) é aplicada na estrutura constituída gerando uma tensão mecânica. Em outras palavras, quando um material é esticado, comprimido ou distorcido, a resistividade elétrica varia. Quase todos os materiais têm essa propriedade, embora alguns apresentem um efeito quase indetectável. No entanto, outros materiais mostram uma grande mudança na resistividade para pequenos esforços mecânicos [3].

Sensores piezoresistivos têm várias características desejáveis, como fabricação simples, circuito de condicionamento de sinal robusto, tamanho relativamente pequeno e grande faixa dinâmica de trabalho [4].

Neste trabalho, o substrato escolhido para a fabricação dos elementos sensores é o papel, um polímero flexível, de baixo custo de fabricação e apresenta boa compatibilidade com o grafite usado para fabricação dos piezoresistores. Ao utilizar substratos de papel para detecção de tensão mecânica é importante considerar as propriedades do próprio papel. Estas propriedades são influenciadas pelo tipo de fibras e gramatura. As características físicas e químicas dos tipos de celulose são: rugosidade, porosidade, impurezas e condições como temperatura e umidade podem causar mudanças dimensionais e também pode levar a flutuações na condutividade elétrica das estruturas condutoras do papel [5].

Usando microscopia eletrônica de varredura – MEV do substrato polimérico - com 430x de ampliação foi possível observar que o substrato é formado por fibras longas, desordenadas caracterizando a não uniformidade da superfície, evidenciando-se elevado grau de rugosidade. O emprego do EDS - *Energy Dispersive System* mostrou que o substrato é quimicamente composto por oxigênio (O) e carbono (C) que juntos representam 94.77% da massa do material com 98.1% de pureza [6].

As técnicas de modelagem baseadas em simulação computacional permitem que o projeto de diafragmas possa ser realizado em uma fração do tempo que os métodos convencionais de tentativa e erro [7].

A distribuição da tensão mecânica no elemento sensor piezoresistivo foi realizada através de simulação computacional com o *software* ANSYS AIM *Student* 19.0, usando o método dos elementos finitos [8].

O método de elementos finitos é um método numérico utilizado em diversas áreas [9]-[11].

A Fig. 1 mostra na forma de diagrama de blocos algumas das etapas da simulação, as quais começam pela definição da

geometria, geração da malha, inclusão das propriedades do material e execução da simulação [12].



Fig. 1. Etapas da simulação computacional.

O projeto de um sensor de pressão, inicia-se com o dimensionamento do diafragma. Este dimensionamento pode ser feito analiticamente ou por método dos elementos finitos [13]. Nos dois métodos é necessário considerar o diafragma de um sensor de pressão como uma placa delgada que sofre pequenas deflexões [14].

## II. METODOLOGIA DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O objetivo da simulação usando FEM é encontrar a região de maior stress mecânico para posicionar mecanicamente piezoresistores de grafite sobre substrato polimérico, quando uma pressão é aplicada, visando obter uma maior sensibilidade do dispositivo sensor projetado para aplicações práticas.

Algumas etapas fundamentais para a correta simulação do dispositivo sensor projetado, em diafragmas retangulares, são apresentadas a seguir.

### A. Definição da Geometria dos Diafragmas Quadrados

O primeiro passo é construir a geometria da viga, onde as dimensões da viga são definidas. Neste trabalho o elemento sensor piezoresistivo apresenta a forma geométrica de um bloco retangular, com dimensões mostradas na Tabela I. Estas dimensões foram escolhidas por serem possíveis de serem fabricadas usando os processos mecânicos disponíveis em nosso laboratório. Porém, outras dimensões podem ser usadas e simuladas de acordo com os projetos específicos exigidos por cada aplicação. As geometrias foram construídas no *software* ANSYS.

TABELA I  
DIMENSÕES DA VIGA

Comprimento (a)	Largura (b)	Espessura (t)	a/b	Fig.
10 mm	10 mm	0,01 mm	1,0	12 (A)
10 mm	8,33 mm	0,01 mm	1,2	12 (B)
10 mm	7,14 mm	0,01 mm	1,4	12 (C)
10 mm	6,25 mm	0,01 mm	1,6	12 (D)
10 mm	5,55 mm	0,01 mm	1,8	12 (E)
10 mm	5 mm	0,01 mm	2,0	12 (F)

O comprimento ( $a=10$  mm) e a espessura ( $t=0,01$  mm) são mantidos fixos, enquanto que a largura ( $b$ ) varia de acordo com a Tabela I.

### B. Geração da Malha

A segunda etapa do processo é a geração da malha, a qual consiste na decomposição do volume total em elementos menores, onde o método dos elementos finitos é aplicado para resolver os sistemas de equações escolhido. Neste trabalho a malha é gerada automaticamente através do gerador de malha, o qual digitaliza e escolhe elementos hexaedros. Caso esta malha não seja completamente definida, o gerador faz uma malha em formato tetraédrico. Quando não é possível definir uma malha geométrica perfeita, assume-se uma malha de menor

qualidade, onde é necessário especificar manualmente as formas apropriadas para resolver o problema em questão [15].

A configuração da malha depende do dimensionamento global, o método escolhido para o tamanho da malha é curvatura e proximidade. Este método aumenta o número de nós e elementos em comparação com o trabalho anterior [15], obtendo uma malha mais refinada, com aumento médio de 52% do número de nós e elementos.

O tamanho mínimo da malha é  $1,301E-06$  m e o tamanho máximo é  $2,603E-4$  m. O tamanho máximo e mínimo da malha varia de acordo com as dimensões geométricas do diafragma.

De outro modo, a Tabela II apresenta o número de nós e o número de elementos de cada geometria do diafragma analisado.

TABELA II  
NÚMERO DE ELEMENTOS E NÓS

a/b	Número de Nós	Número de Elementos
1,0	36000	5041
1,2	35204	4928
1,4	35584	4698
1,6	32228	4505
1,8	30524	4263
2,0	28708	4004

### C. Propriedades Físicas

O próximo passo é a determinação das condições de contorno do problema, onde as propriedades físicas do material são definidas, bem como a região onde a pressão é aplicada e a região de engaste da viga. Os diafragmas quadrados foram engastados nos quatro lados.

Para gerar a tensão mecânica, é necessário adequar as unidades de medidas aos padrões do ANSYS [16], onde os pesos aplicados devem ser convertidos em pressão, de acordo com a Equação (1),

$$P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} \quad (1)$$

onde  $F$  é a força aplicada,  $A$  é a área da secção transversal.

Na Fig. 2, apresenta-se a geometria do diafragma quadrado. Observa-se que a área da secção transversal é um retângulo  $b \times t$ , e que a espessura,  $t$ , está fora de escala, pois o seu valor real de 0,01 mm não fica visível.

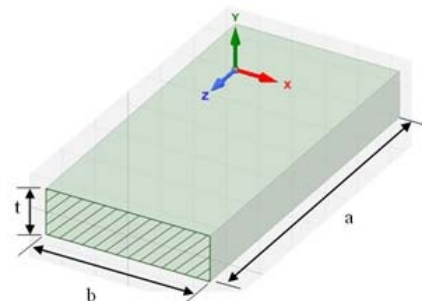


Fig. 2. Ilustração da geometria do diafragma quadrado.

Usando a Equação (1) foi realizado o cálculo da pressão para as 10 massas e seis diafragmas analisados mostrados nas Tabela III até VIII.

TABELA III  
CONVERSÃO DA MASSA EM PRESSÃO  
a/b=1,0 a=10 mm e b=10 mm

Símbolo	Massa (kg)	Área (m <sup>2</sup> )	Pressão (Pa)
m <sub>1</sub>	1,04E-04	1,00E-07	1,02E+04
m <sub>2</sub>	1,42E-04	1,00E-07	1,39E+04
m <sub>3</sub>	2,80E-04	1,00E-07	2,74E+04
m <sub>4</sub>	3,59E-04	1,00E-07	3,51E+04
m <sub>5</sub>	3,92E-04	1,00E-07	3,84E+04
m <sub>6</sub>	4,09E-04	1,00E-07	4,01E+04
m <sub>7</sub>	4,48E-04	1,00E-07	4,39E+04
m <sub>8</sub>	6,39E-04	1,00E-07	6,27E+04
m <sub>9</sub>	8,34E-04	1,00E-07	8,18E+04
m <sub>10</sub>	1,23E-03	1,00E-07	1,21E+05

TABELA IV  
CONVERSÃO DA MASSA EM PRESSÃO  
a/b=1,2 a=10 mm e b=8,33 mm

Símbolo	Massa (kg)	Área (m <sup>2</sup> )	Pressão (Pa)
m <sub>1</sub>	1,04E-04	8,33E-08	1,22E+04
m <sub>2</sub>	1,42E-04	8,33E-08	1,66E+04
m <sub>3</sub>	2,80E-04	8,33E-08	3,29E+04
m <sub>4</sub>	3,59E-04	8,33E-08	4,22E+04
m <sub>5</sub>	3,92E-04	8,33E-08	4,61E+04
m <sub>6</sub>	4,09E-04	8,33E-08	4,81E+04
m <sub>7</sub>	4,48E-04	8,33E-08	5,27E+04
m <sub>8</sub>	6,39E-04	8,33E-08	7,52E+04
m <sub>9</sub>	8,34E-04	8,33E-08	9,81E+04
m <sub>10</sub>	1,23E-03	8,33E-08	1,45E+05

TABELA V  
CONVERSÃO DA MASSA EM PRESSÃO  
a/b=1,4 a=10 mm e b=7,14 mm

Símbolo	Massa (kg)	Área (m <sup>2</sup> )	Pressão (Pa)
m <sub>1</sub>	1,04E-04	7,14E-08	1,42E+04
m <sub>2</sub>	1,42E-04	7,14E-08	1,94E+04
m <sub>3</sub>	2,80E-04	7,14E-08	3,84E+04
m <sub>4</sub>	3,59E-04	7,14E-08	4,92E+04
m <sub>5</sub>	3,92E-04	7,14E-08	5,38E+04
m <sub>6</sub>	4,09E-04	7,14E-08	5,62E+04
m <sub>7</sub>	4,48E-04	7,14E-08	6,15E+04
m <sub>8</sub>	6,39E-04	7,14E-08	8,77E+04
m <sub>9</sub>	8,34E-04	7,14E-08	1,14E+05
m <sub>10</sub>	1,23E-03	7,14E-08	1,69E+05

TABELA VI  
CONVERSÃO DA MASSA EM PRESSÃO  
a/b=1,6 a=10 mm e b=6,25 mm

Símbolo	Massa (kg)	Área (m <sup>2</sup> )	Pressão (Pa)
m <sub>1</sub>	1,04E-04	6,25E-08	1,62E+04
m <sub>2</sub>	1,42E-04	6,25E-08	2,22E+04
m <sub>3</sub>	2,80E-04	6,25E-08	4,38E+04
m <sub>4</sub>	3,59E-04	6,25E-08	5,62E+04
m <sub>5</sub>	3,92E-04	6,25E-08	6,15E+04
m <sub>6</sub>	4,09E-04	6,25E-08	6,42E+04
m <sub>7</sub>	4,48E-04	6,25E-08	7,03E+04
m <sub>8</sub>	6,39E-04	6,25E-08	1,00E+05
m <sub>9</sub>	8,34E-04	6,25E-08	1,31E+05
m <sub>10</sub>	1,23E-03	6,25E-08	1,94E+05

TABELA VII  
CONVERSÃO DA MASSA EM PRESSÃO  
a/b=1,8 a=10 mm e b=5,55 mm

Símbolo	Massa (kg)	Área (m <sup>2</sup> )	Pressão (Pa)
m <sub>1</sub>	1,04E-04	5,55E-08	1,83E+04
m <sub>2</sub>	1,42E-04	5,55E-08	2,50E+04
m <sub>3</sub>	2,80E-04	5,55E-08	4,94E+04
m <sub>4</sub>	3,59E-04	5,55E-08	6,33E+04
m <sub>5</sub>	3,92E-04	5,55E-08	6,93E+04
m <sub>6</sub>	4,09E-04	5,55E-08	7,23E+04
m <sub>7</sub>	4,48E-04	5,55E-08	7,91E+04
m <sub>8</sub>	6,39E-04	5,55E-08	1,13E+05
m <sub>9</sub>	8,34E-04	5,55E-08	1,47E+05
m <sub>10</sub>	1,23E-03	5,55E-08	2,18E+05

TABELA VIII  
CONVERSÃO DA MASSA EM PRESSÃO  
a/b=2,0 a=10 mm e b=5 mm

Símbolo	Massa (kg)	Área (m <sup>2</sup> )	Pressão (Pa)
m <sub>1</sub>	1,04E-04	5,00E-08	2,03E+04
m <sub>2</sub>	1,42E-04	5,00E-08	2,77E+04
m <sub>3</sub>	2,80E-04	5,00E-08	5,48E+04
m <sub>4</sub>	3,59E-04	5,00E-08	7,03E+04
m <sub>5</sub>	3,92E-04	5,00E-08	7,69E+04
m <sub>6</sub>	4,09E-04	5,00E-08	8,02E+04
m <sub>7</sub>	4,48E-04	5,00E-08	8,78E+04
m <sub>8</sub>	6,39E-04	5,00E-08	1,25E+05
m <sub>9</sub>	8,34E-04	5,00E-08	1,64E+05
m <sub>10</sub>	1,23E-03	5,00E-08	2,42E+05

TABELA IX  
PROPRIEDADES FÍSICAS DO PAPEL

Propriedade	Valor	Referência
Módulo de <i>Young</i>	1,04E-04	[17]
<i>Poisson</i>	1,42E-04	[17]
Densidade	2,80E-04	*

\* É a relação entre a gramatura e a espessura do papel, 75 g/m<sup>2</sup> por 0,088 mm

### III. MODELAGEM MATEMÁTICA

As soluções analíticas determinam a distribuição do esforço mecânico sobre um diafragma quadrado. Para as soluções, considera-se as dimensões geométricas: espessura e razões de largura/comprimento. Além disso, utiliza-se o Módulo de *Young*, *E*, e o Coeficientes de *Poisson*.

Considerando o esforço mecânico, as dimensões da estrutura e a pressão aplicada, *P*, determina-se as componentes do esforço mecânico no diafragma, as quais podem ser expressas em função da deflexão sofrida, de acordo com a Equação (2),

$$y_{\text{máx}} = \frac{\alpha P b^4}{E t^3} \quad (2)$$

onde  $\alpha$  é um parâmetro dado em função das condições de contorno aplicada as bordas da placa engastada e das relações entre comprimento e largura (*a/b*) conforme ilustra a Fig. 3 [14].

Em uma placa delgada a tensão mecânica máxima,  $T_{\text{máx}}$ , na direção longitudinal é expressa de acordo com a Equação (3),

$$T_{\text{máx}} = \frac{\beta P b^2}{t^2} \quad (3)$$

A Tabela IX lista as propriedades do papel A4 usadas na fabricação de elementos sensor piezoresistivos.

onde  $\beta$  é a relação dos lados  $a/b$  mostrados na Tabela X.

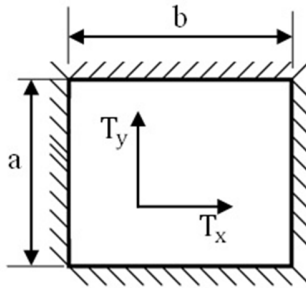


Fig. 3. Diafragma quadrado engastado em todos os lados mostrando a direção dos esforços mecânicos longitudinais ( $T_x$ ) e transversais ( $T_y$ ). Vista superior.

TABELA X  
PARÂMETROS  $\alpha$  E  $\beta$  PARA PLACAS RETANGULARES COM TODAS AS EXTREMIDADES FIXAS

a/b	$\alpha$	$\beta$
1,0	0,0138	0,3078
1,2	0,0188	0,3834
1,4	0,0226	0,4356
1,6	0,0251	0,4680
1,8	0,0267	0,4872
2,0	0,0277	0,4974

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando a Equação (3), foi determinado as tensões mecânicas máximas em função da pressão aplicada nas estruturas estudadas.

Na Fig. 4 a Fig. 9 apresenta-se a variação da tensão mecânica em função da massa aplicada. Os gráficos mostram um comparativo entre o método analítico e a simulação computacional por elementos finitos.

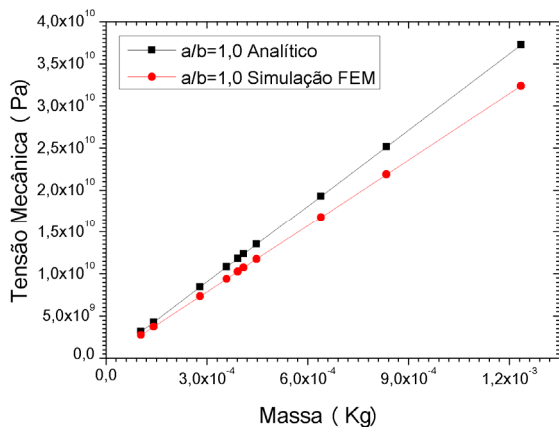


Fig. 4. Variação da Tensão Mecânica em função da Massa. Diafragma Quadrado  $a/b=1,0$ .

As curvas expostas na Fig. 4 a Fig. 9 apresentam um crescimento linear, ou seja, ao aumentar o valor da massa também se eleva a tensão mecânica máxima. O erro relativo médio de cada curva é respectivamente de 13,02%, 13,00%, 13,25%, 13,56%, 14,03% e 14,80% em comparação entre o cálculo analítico e a simulação computacional FEM. As diferenças mostradas no comparativo entre o método

analítico e o simulado não divergem em erros relativos para massas maiores. O que se verifica é apenas o escalonamento, ou seja, a distância entre os valores das massas disponíveis, usadas em trabalhos anteriores [15].

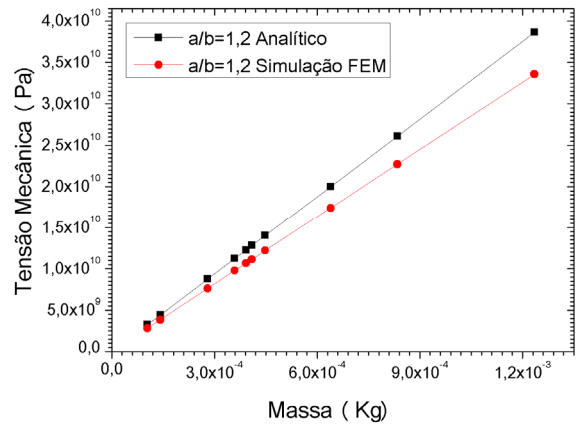


Fig. 5. Variação da Tensão Mecânica em função da Massa. Diafragma Quadrado  $a/b=1,2$ .

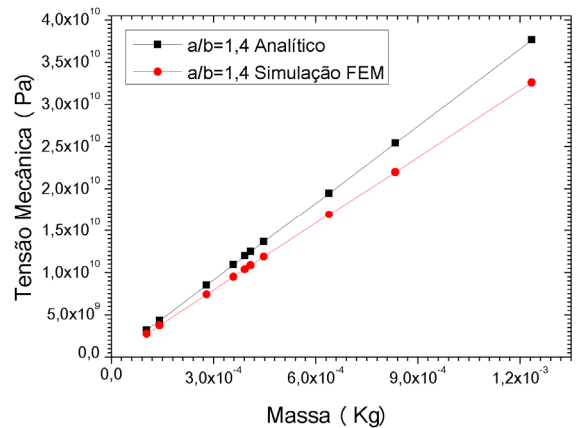


Fig. 6. Variação da Tensão Mecânica em função da Massa. Diafragma Quadrado  $a/b=1,4$ .

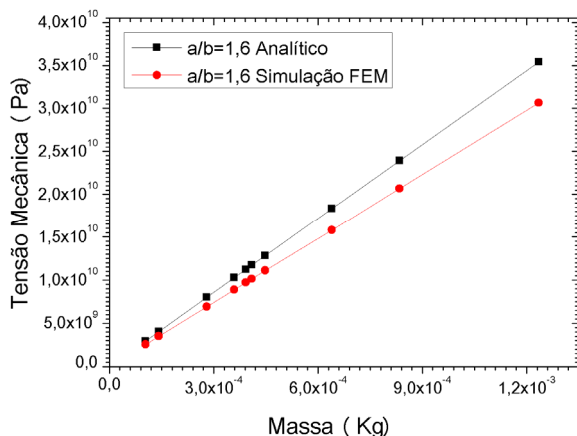


Fig. 7. Variação da Tensão Mecânica em função da Massa. Diafragma Quadrado  $a/b=1,6$ .

A tensão mecânica máxima encontra-se na mesma escala de potência ( $10^{10}$  Pa) quando comparado com os trabalhos anteriores dado em [6] e [15]. Isto significa que os resultados estão de acordo com a literatura.

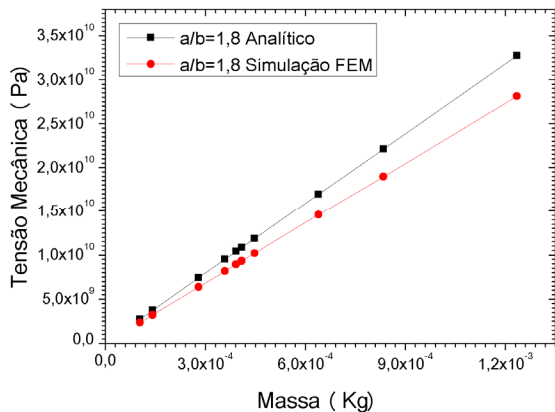


Fig. 8. Variação da Tensão Mecânica em função da Massa. Diafragma Quadrado a/b=1,8.

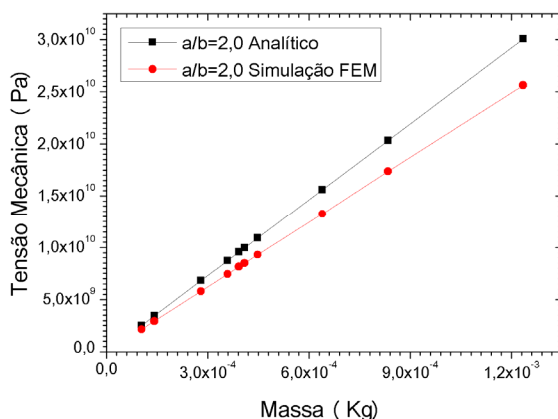


Fig. 9. Variação da Tensão Mecânica em função da Massa. Diafragma Quadrado a/b=2,0.

Na Fig. 10 apresenta-se a variação da tensão mecânica em função da massa. O gráfico mostra o cálculo analítico e faz um comparativo entre todos os tipos de diafragmas quadrados estudados neste artigo. É possível observar que, a geometria a/b=1,2 apresenta a maior tensão mecânica, seguida da geometria a/b=1,4. A menor tensão mecânica é dada pela relação a/b=2,0.

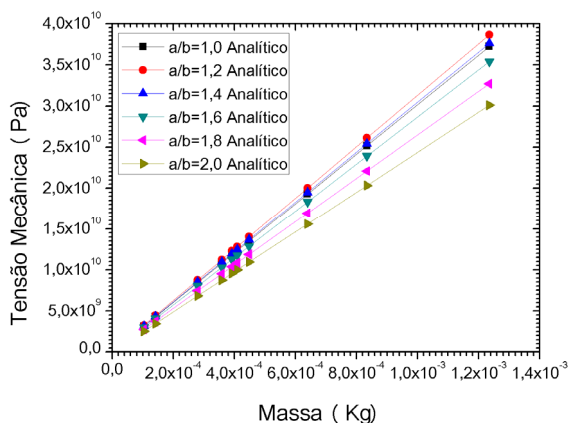


Fig. 10. Variação da Tensão Mecânica em função da Massa. Cálculo analítico comparativo entre todos os tipos de diafragmas quadrados.

A diferença entre os cálculos analíticos mostrados na Fig. 10 e nos simulados, mostrados na Fig. 11, é pequena

chegando a 13,61%. Nestas figuras é possível observar um crescimento linear, aumentando-se a pressão aplicada, ocorre um aumento na tensão mecânica máxima. Em relação a forma geométrica, aumentando-se a largura, b, ocorre um aumento na tensão mecânica. Estas características podem ser levadas em consideração pelo projetista de sensores de forma a adequar o dispositivo para a aplicação desejada.

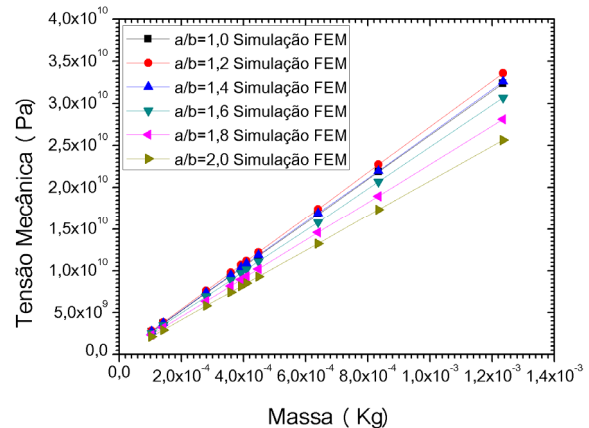


Fig. 11. Variação da Tensão Mecânica em função da Massa. Simulação Computacional em ANSYS comparativo entre todos os tipos de diafragmas quadrados.

As análises realizadas indicam que os erros relativos médios encontrados quando se comparam os métodos analíticos e simulados são aceitáveis em projeto de sensores piezoresistivos [18]. Os resultados obtidos garantem uma boa sensibilidade dos dispositivos que possam ser projetados ou fabricados com as dimensões propostas neste trabalho. De outro modo, os resultados apresentam uma ótima linearidade, visto serem pequenas as deformações sofridas pelas estruturas projetadas e que usem as cargas (massas) propostas.

Os resultados apresentados na Fig. 12 referem-se as simulações computacionais realizadas em ANSYS. Nestas simulações são mostradas as regiões de maior e menor estresse mecânico para o diafragma quadrado. A massa aplicada nestas simulações é 1,04E-04 kg. As propriedades físicas do substrato utilizado foram descritas na Tabela IX e todos os lados do diafragma quadrado foram engastados.

Os resultados da distribuição do estresse de Von Mises indicam a tensão mecânica máxima e mínima para cada geometria dos diafragmas e estão descritos na Tabela XI. A geometria da Fig. 12 B indica a tensão mecânica máxima de 2,835E9 Pa enquanto que a tensão mecânica mínima é 2,659E4 Pa mostrada na Fig. 12 C.

TABELA XI  
TENSÃO MECÂNICA MÁXIMA E MÍNIMA DOS DIAFRAGMAS

Comp.(a)	Largura (b)	Tensão mecânica máxima	Tensão mecânica mínima	Fig.
10 mm	10 mm	2,729E9 Pa	5,62E4 Pa	12 (A)
10 mm	8,33 mm	2,835E9 Pa	4,235E4 Pa	12 (B)
10 mm	7,14 mm	2,738E9 Pa	2,659E4 Pa	12 (C)
10 mm	6,25 mm	2,56E9 Pa	1,213E5 Pa	12 (D)
10 mm	5,55 mm	2,36E9 Pa	1,212E5 Pa	12 (E)
10 mm	5 mm	2,151E9 Pa	9,129E4 Pa	12 (F)



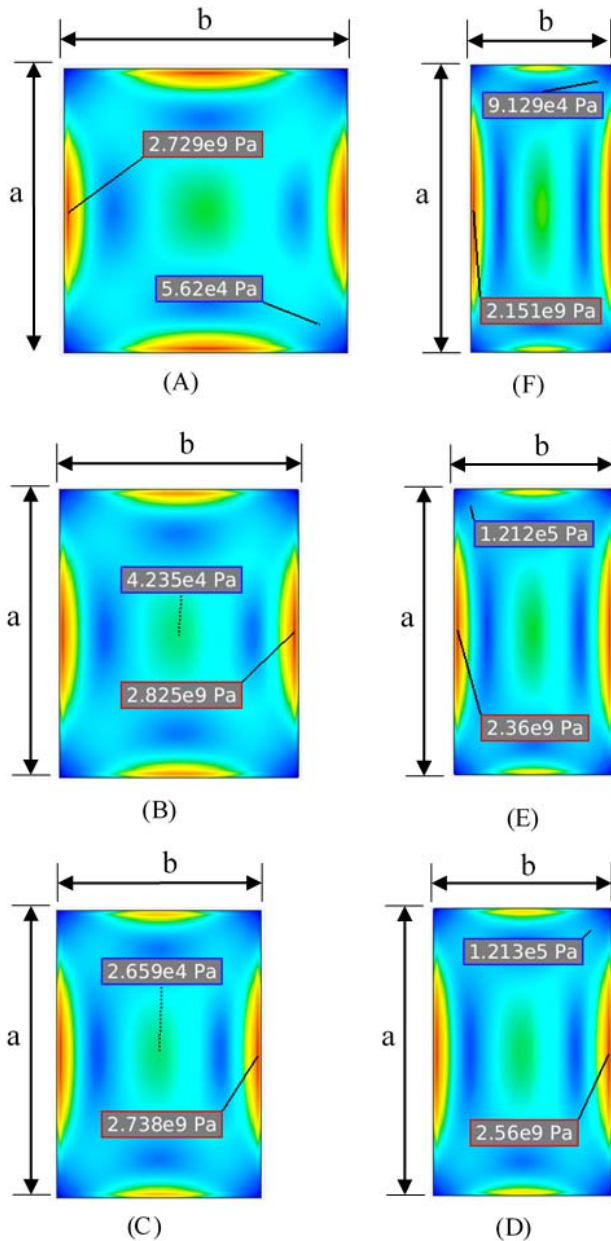


Fig. 12. Distribuição do Stress de Von Mises nos diafragmas quadrados. (A)  $a=10$  mm e  $b=10$  mm. (B)  $a=10$  mm e  $b=8,33$  mm. (C)  $a=10$  mm e  $b=7,14$  mm. (D)  $a=10$  mm e  $b=6,25$  mm. (E)  $a=10$  mm e  $b=5,55$  mm. (F)  $a=10$  mm e  $b=5$  mm. Massa  $1 = 1,04E-04$  kg.

Todas as simulações realizadas permitiram identificar que a tensão mecânica é máxima nas bordas e mínima no centro como mostram os diafragmas da Fig. 12. Isto significa que, o ideal seria que cada piezoresistor fosse considerado um ponto no meio das bordas do diafragma para aproveitar o máximo estresse mecânico produzido. Entretanto, devido as diferentes etapas de processamento necessárias para a fabricação de piezoresistores de grafite pelo processo de esfoliamento mecânico, verifica-se que dimensões geométricas maiores facilitam os processos mecânicos, mas tornam os dispositivos eletromecânicos maiores o que, em muitas aplicações práticas, podem se tornar indesejáveis.

Ao diminuir a largura,  $b$ , do diafragma, a tensão mecânica máxima fica localizada nas bordas do comprimento,  $a$ , o qual é mantido fixo em 10 milímetros.

## V. CONCLUSÃO

Este artigo descreve uma metodologia prática para o cálculo analítico e simulação computacional para determinar, adequadamente, o melhor posicionamento de um elemento sensor piezoresistivo de grafite, em regiões de máxima tensão mecânica em substratos tipo papel A4. A análise realizada mostra que diafragmas cuja razão  $a/b=1$  são os mais sensíveis aos pequenos esforços mecânicos e garantem uma ótima sensibilidade aos sensores fabricados. Os resultados obtidos analiticamente apresentam em média um desvio relativo de 14% quando comparados com os simulados, mostrando que os valores são aceitáveis para projeto de dispositivos sensores que usam a tecnologia de deposição de grafite através de esfoliação mecânica direta sobre substratos poliméricos. Portanto, este trabalho apresentou, pela primeira vez, uma comparação entre modelos analíticos e simulações para projeto de dispositivos sensores usando grafite sobre papel para um processo de fabricação de sensores de baixo custo.

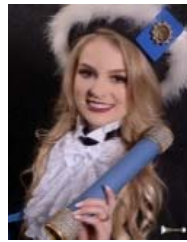
## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Programa Institucional de Incentivo à Qualificação Profissional dos Servidores do Instituto Federal Farroupilha (PIIQP) e pelo Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da UNIJUÍ.

## REFERÊNCIAS

- [1] H. Heidari, N. Wacker, and R. Dahiya, "Bending induced electrical response variation in ultra-thin flexible chips and device modeling," *Applied Physics Reviews*, vol. 4, pp. 031101/20, July. 2017.
- [2] L. Xu, and W. Chang, "Sensitivity for a microresonant beam pressure sensor with docks," *J Mechanical Engineering Science*, vol. 227, no. 4, pp. 852-861, June. 2012, 10.1177/0954406212452216.
- [3] G. K. Johns, "Modeling piezoresistivity in silicon and polysilicon," *Journal of Applied Engineering Mathematics*, vol. 2, pp. 1-5. Apr. 2006.
- [4] S.-J. Park, J. C. Doll, and B. L. Pruitt, "Piezoresistive Cantilever Performance-Part I: Analytical Model for Sensitivity," *J Microelectromech Syst.* vol. 19, pp. 137-148, Feb. 2010.
- [5] S. K. Mahadeva, K. Walus, and B. Stoeber, "Paper as a Platform for Sensing Applications and Other Devices: A Review," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 7, no. 16, pp. 8345-8362, Mar. 2015.
- [6] L. Scarton, "Desenvolvimento, simulação matemática e caracterização de dispositivos sensores piezoresistivos de grafite," Ph.D. dissertação, DCEEng, Unijuí, Ijuí, BR, 2017.
- [7] M. K. Mirza, F. Abdullah, and L. Finkelstein, "Analysis and design of piezoresistive pressure sensors using the finite element method," *Trans Inst MC*, vol. 13, no. 1, Jan. 1991.
- [8] H. Panzer, J. Hubele, R. Eid, and B. Lohmann, "Generating a Parametric Finite Element Model of a 3D Cantilever Timoshenko Beam Using Matlab," in *Technical Reports on Automatic Control*, vol. 4, pp. 1-8, Nov. 2009.
- [9] P. C. A. Mota, M. L. R. Chaves, and J. R. Camacho. "Determination of Tower Surge Impedance Using Finite Element Method" *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 5, pp. 1410-1415, May. 2018.
- [10] A. L. Oliveira, A. Pelizari and A. J. Sguarezi Filho. "Finite Element Analysis Simulation Of Switched Reluctance Motor Drive" *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 7, pp. 1928-1933, July. 2018.
- [11] A. E. Hoffer, R. H. Moncada, B. J. Pavez, and J. A. Tapia. "A Novel Method for Finite-Element Modeling of a Commercial Synchronous Reluctance Machine" *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 3, pp. 806-812, March. 2018.

- [12] R. Gabbi, L. A. Rasia, P. C. Pedralli, G. G. Silva, L. Scarton, and A. C. Valdiero, "Computational Simulation of a Piezoresistive Graphite Sensor Element using Finite Element Metho," in *XVI Brazil MRS Meeting*, Gramado, RS, Brasil, 2017, pp. 828-828.
- [13] M. A. Fraga, L. L. Koberstein, S. F. da Luz, L. A. Rasia, and H. Furlan, "Design and simulation of a piezoresistive pressure microsensor," in *COBEM*, Ouro Preto, MG, Brasil, 2005, pp. 1-8.
- [14] S. Timoschenko, and S. Woinowsky-Krieger, "Theory of plates and shells," 2 th edition, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2001, pp. 1-575.
- [15] R. Gabbi, L. A. Rasia, A. C. Valdiero, and M. T. T. Gabbi, "An approach for computational simulation of the elements piezoresistives of graphite," *IJDR*, vol. 8, no. 2, pp. 19150-19155, Feb. 2018.
- [16] S. M. Firdaus, H. Omar, and I. A. Azid, "High Sensitive Piezoresistive Cantilever MEMS Based Sensor by Introducing Stress Concentration Region (SCR)," in *Finite Element Analysis - New Trends and Developments*, New Delhi, India, 2012, ch 11, pp. 225-252.
- [17] G. G. Silva, L. Scarton, R. Gabbi, A. M. R. Dutra, L. A. Rasia, and A. C. Valdiero, "Modelagem, Caracterização e Análise dos Fatores de Sensibilidade de Elementos Piezoresistivos de Grafite." *SODEBRAS*, vol. 11, no.128, pp. 112-115, Aug. 2016.
- [18] H. Furlan, M. A. Fraga, L. L. Koberstein and L. A. Rasia. "Modeling of MEMS Piezoresistive Sensors" in *Pesquisas Aplicadas em Modelagem Matemática*, 1ed, vol. 1, Ed Unijui, Ijuí, BR, 2012, ch 8, pp. 215-240.



**Maiara Thaís Tolfo Gabbi** possui graduação em Ciências Econômicas pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Palmeira das Missões/RS, Brasil (2017). Atualmente ela é Bolsista da CAPES no Programa de Pós-Graduação em Agronegócios (PPGAGR/UFSM).



**Renan Gabbi** possui graduação em Matemática Licenciatura pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), Ijuí, RS, Brasil, (2010) e Mestrado em Modelagem Matemática pela UNIJUÍ, (2013). Iniciou em 2015 o Doutorado em Modelagem Matemática pela UNIJUÍ.

Atualmente, ele é docente no Instituto

Federal Farroupilha - *Campus Panambi*.



**Luiz Antônio Rasia** possui graduação em Física (1986), especialização em Ensino de Física (1991), mestrado (1997) e doutorado (2009) em Engenharia Elétrica com área de concentração em Microeletrônica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atualmente é professor adjunto da Universidade Regional do Noroeste do

Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ atuando no programa Strictu Sensu de Mestrado e Doutorado em Modelagem Matemática, Campus Ijuí-RS e no Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia Industrial no campus Panambi-RS.



**Antonio Carlos Valdiero** é Engenheiro Mecânico (UFRJ, 1992), Mestre em Engenharia Mecânica (UFSC, 1994) e Doutor em Engenharia Mecânica (UFSC, 2005), ambos os títulos com ênfase no Projeto de Sistemas Mecânicos.

De 1994 a 2019 foi Professor Adjunto da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ.