

Evento: IX Seminário de Inovação e Tecnologia - BOLSISTAS DE GRADUAÇÃO UNIJUI

**METODOLOGIA PARA A CARACTERIZAÇÃO DO GAUGE FACTOR DE
SENSORES PIEZORESISTIVOS FABRICADOS PELA TÉCNICA GOP¹
METHODOLOGY FOR THE CHARACTERIZATION OF PIEZORESISTIVE
SENSORS'S GAUGE FACTOR MANUFACTURED BY GOP TECHNIQUE**

**Edmilton Oliveira Stein², Ben-Hur Ribas Maciel³, Carlos Augusto
Valdiero⁴, Luiz Antonio Rasia⁵, Antonio Carlos Valdiero⁶, Matias Alles
Hubert⁷**

¹ Trabalho de Iniciação Científica vinculado ao Projeto: Inovação e Projeto de Máquinas Inteligentes, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, desenvolvido no Campus Panambi.

² Bolsista PIBITI/CNPq, aluno do curso de graduação em Engenharia Mecânica da Unijuí. E-mail: e_stein@outlook.com

³ Bolsista PIBIC/CNPq, aluno do curso de graduação em Engenharia Mecânica da Unijuí. E-mail: begonhur@gmail.com

⁴ Bolsista PIBITI/CNPq, aluno do curso de graduação em Ciência da Computação da Unijuí. E-mail: carlos_valdiero@hotmail.com

⁵ Professor Doutor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias; Líder do Grupo de Pesquisa em Materiais e Dispositivos - GPMaD/UNIJUI; E-mail: rasia@unijui.edu.br (Orientador)

⁶ Professor doutor da Faculdade Horizontalina. E-mail: antoniocvaldiero@gmail.com

⁷ Aluno do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Unijuí. E-mail: matias__hubert@hotmail.com

INTRODUÇÃO

O sensor apresentado no presente trabalho trata-se de um sensor piezoresistivo fabricado pela técnica GOP (Graphite on Paper). Esta técnica consiste, segundo Pedrali *et al.* (2018) da deposição do elemento sensor, grafite, por meio de uma exfoliação mecânica do mesmo sobre um substrato de papel. Este sensor possui como característica o seu baixo custo, em razão deste não conter materiais convencionais como Silício por exemplo, mas sim materiais orgânicos como papel e grafite comercial, além de não necessitar de nenhum produto químico ou processo especial para sua obtenção.

Graças a sua composição orgânica estes sensores também apresentam características importantes como biocompatibilidade, flexibilidade, leveza, além de mais fácil reciclagem e decomposição (GABBI *et al.*, 2017). Desta forma, estes sensores apresentam-se como alternativas econômicas e sustentáveis. Os sensores obtidos pela técnica GoP possuem aplicações como um sensor piezoresistivo, sendo uma alternativa para medir e monitorar deformações em um material. Além apresentarem respostas a variação de temperatura como observado por Gabbi *et al.* (2017).

O princípio de funcionamento do sensor está baseado no fato de que este varia sua resistência elétrica quando submetido a uma tensão ou deformação causada por uma carga de natureza qualquer (BERKENBROCK *et al.*, 2018), sendo esta variação de resistência em razão de sua deformação reversível. Isto ocorre devido à componente de tensão mecânica presente na definição

Evento: IX Seminário de Inovação e Tecnologia - BOLSISTAS DE GRADUAÇÃO UNIJUI

do efeito piezoresistivo (BERKENBROCK *et al.*, 2018; PEDRALI *et al.*, 2018). Segundo Pedrali *et al.* (2018) a taxa de variação da resistência elétrica de um sensor em razão de sua deformação é definida como fator de sensibilidade ou *Gauge Factor*, e este depende da orientação cristalográfica do material, e é relacionado com o coeficiente piezoresistivo e com o Módulo de Young.

Em razão das deformações específicas a serem mensuradas para a determinação do Fator de Sensibilidade serem da ordem de $\mu\text{m/m}$, estas requerem equipamentos especiais para realizá-las. Dessa forma, sugere-se como método para sua determinação, a fixação do sensor piezoresistivo sobre um cantilever metálico, de forma que a deformação normal na superfície do cantilever, em sua direção longitudinal, seja diretamente transferida para o sensor, assim possibilitando por meio de modelagem matemática do cantilever e de métodos numéricos, determinar-se a deformação específica em que o sensor está submetido ao mesmo tempo em que sua resistência elétrica é mensurada. Assim, tornando possível a estimativa do Fator de Sensibilidade do sensor em estudo.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho consiste em identificar as necessidades do projeto, e desenvolver uma maquete eletrônica de uma estrutura para a fixação do cantilever por meio do *Software* Dassault SolidWorks. Arbitrar um material dúctil para fabricação do cantilever e verificar suas propriedades mecânicas, e por intermédio de modelagem matemática do mesmo, verificar a deformação específica do material na região em que o sensor é posicionado, assim como utilizar um método numérico como redundância para a determinação do mesmo.

Como necessidades do projeto destacam-se a presença de uma estrutura robusta, capaz de sustentar o cantilever e a instrumentação necessária para a realização do experimento. A estrutura deve ser móvel, assim possibilitando o transporte e movimentação no interior do laboratório e entre laboratórios. Deve apresentar uma superfície facilmente higienizável na região de trabalho, para evitar a presença de qualquer partícula estranha durante a realização do experimento.

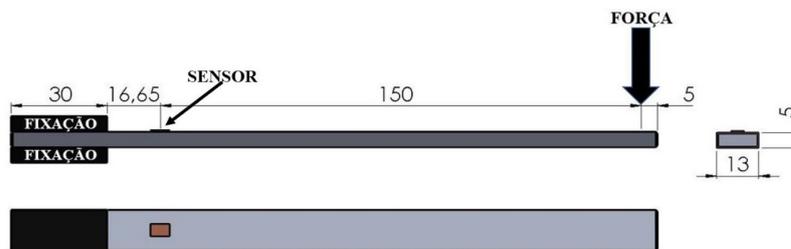
O Cantilever consiste em uma viga de seção retangular, cujo material foi arbitrado, para fim de exemplificação neste trabalho, como a liga de alumínio 1060, cujo Módulo de Young é $6,9 \times 10^{10}$ Pa. O sensor é então colado no sentido longitudinal sobre a face tracionada da viga, de forma a absorver toda a deformação específica em que a superfície da viga está submetida.

Para que isso ocorra, é necessário que o sensor esteja corretamente fixado sobre a viga, para tal é seguido o seguinte procedimento para a colagem do sensor. Conforme descrito por Minela (2017), a superfície onde o sensor é fixado deve ser antes lixada com angulações de 45° , após a superfície apresentar ranhuras corretas para a fixação do sensor, esta é limpa com uma solução de acetona ou álcool isopropílico e gaze, e então dá-se início a colagem do sensor.

Para a correta leitura de sinal é necessário que o sensor esteja corretamente alinhado ao sentido longitudinal da viga, assim como bem centralizado. Em razão disso Minela (2017) indica a utilização de uma fita adesiva transparente para facilitar o posicionamento e proteger o sensor. Após o posicionamento o sensor deve ser colado com uma cola adequada e não reagente com os materiais. Uma imagem ilustrativa da disposição do sensor sobre a viga pode ser vista na Figura 1.

Evento: IX Seminário de Inovação e Tecnologia - BOLSISTAS DE GRADUAÇÃO UNIJUI

Figura 1 - Cantilever com o sensor devidamente fixado.



Fonte: Autoria Própria.

Para a obtenção da deformação específica do sensor fabricado pela técnica GOP, é necessário em primeiro lugar obter esta deformação de forma analítica. Para tal, assumindo o cantilever com secção retangular como visto na Figura 1, tem-se a Equação 1 para a determinação da tensão normal na superfície da viga, onde o sensor é fixado, em que “M” é o momento fletor atuante no sensor, “c” é a distância entre a linha neutra e a superfície tracionada e “I” é o momento de inércia da viga. Também é por meio desta equação que é verificado se a tensão máxima em que o material está submetido não ultrapassa a tensão de escoamento do material, causando alteração permanente na estrutura e propriedades do material, com a única diferença em que o momento fletor é analisado em relação a distância entre a força aplicada e a fixação da viga.

$$\sigma_m = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

O momento de inércia da viga pode ser obtido pela Equação 2, na qual “b” é a medida da base da área transversal da viga e “h” é a medida da altura da viga.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

Assim, por intermédio da Lei de Hooke para tensão uniaxial, observada na Equação 3, pode ser aplicada para obter a deformação específica, na qual “ε” representa a deformação específica e “E” o Módulo de Young, resultando na Equação 4.

$$\sigma_m = E\varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{12Mc}{Ebh^3} \quad (4)$$

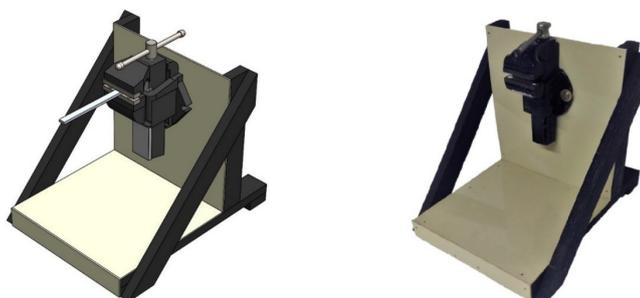
Como método para verificação dos resultados é utilizado o método de elementos finitos por meio do *software* Ansys®, em que, as medidas da seção transversal do cantilever são definidas com 13 mm em sua base e 5 mm de altura. Para melhor qualidade dos resultados é utilizada uma malha com elementos hexaédricos com uma medida média de 2 mm, o que provou por meio da avaliação do “skewness” dos elementos, ser compatível com o problema proposto.

Evento: IX Seminário de Inovação e Tecnologia - BOLSISTAS DE GRADUAÇÃO UNIJUI

RESULTADOS E DISCUSSÃO

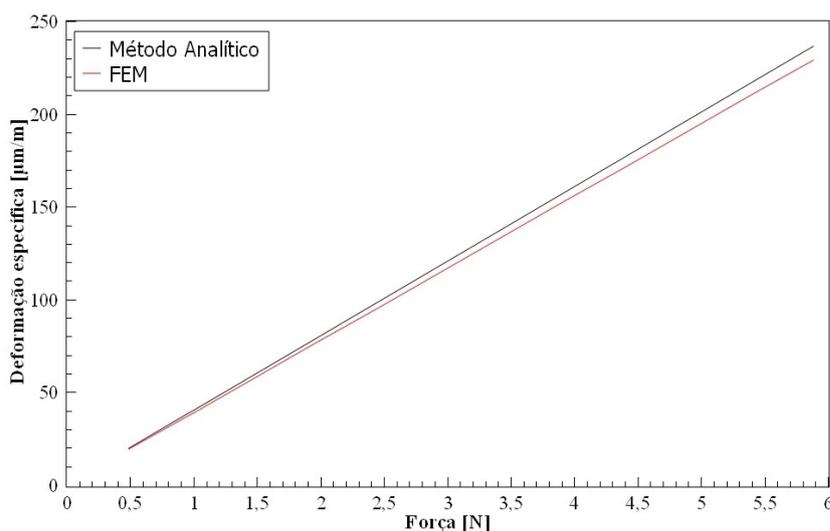
Como resultado uma estrutura de madeira foi projetada com auxílio do *software* CAD (*Computer Aided Design*) Dassault SolidWorks, que é coberta com placas poliméricas para permitir a mais fácil higienização do ambiente conforme previsto nas necessidades do projeto. Para a fixação do corpo de prova, ou seja, do cantilever, é utilizado uma morsa número 2". A maquete eletrônica juntamente com seu protótipo, podem ser observados na Figura 2.

Figura 2 - Maquete eletrônica seguida de seu protótipo.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3 - Comparação de deformação específica em que o sensor está submetido, obtido pelo método analítico e pelo método de elementos finitos.



Fonte: Autoria Própria.

Por meio do método analítico e do método de elementos finitos é analisado a deformação

Evento: IX Seminário de Inovação e Tecnologia - BOLSISTAS DE GRADUAÇÃO UNIJUI

específica com a viga carregada com massas de 50g a 600g, com uma variação de 50g a cada medição. A carga é posicionada de acordo com o que pode ser observado na Figura 1, resultando nas deformações apresentadas na Figura 3, em que é apresentada a deformação obtida pelo método analítico e numérico. No Figura 3 pode ser observado que há uma pequena divergência na deformação específica entre os dois métodos de aproximadamente 3%, que embora de pequena magnitude deve ser considerada durante a verificação do fator de sensibilidade do sensor. Assim, conhecendo-se a deformação específica em que o sensor está submetido, o *Gauge Factor* do mesmo pode ser determinado pela divisão da variação de sua resistência elétrica por sua correspondente deformação específica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do método utilizado, é possível identificar a deformação específica na superfície do cantilever, mais especificamente, na região em que o sensor está posicionado. Desta forma, permitindo por meio da modelagem matemática do cantilever obter a deformação específica que o sensor está submetido, permitindo desta forma obter as respostas de variação de resistência do sensor até para variações de deformações específicas inferiores a 10 $\mu\text{m/m}$.

Uma simulação utilizando o método de elementos finitos é realizada visando obter maior segurança nos resultados obtidos analiticamente, avaliando a presença de possíveis erros. Assim, o método descrito prova-se adequado para a determinação do *Gauge Factor*, ou Fator de Sensibilidade, dos sensores fabricado por meio da técnica GOP.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão ao CNPq, à FAPERGS (Edital Pesquisador Gaúcho 2017) e à UNIJUI, pelos recursos para aquisição de equipamentos para a construção de protótipos para pesquisa de mestrado e doutorado e bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica.

REFERÊNCIAS

- BEER, Ferdinand P. et al. **MECHANICS OF MATERIALS**. 6. ed. New York: Mcgraw-hill, 2012. 758 p.
- BERKENBROCK, Rafael et al. Piezoresistive Graphite Sensors Encapsulated With Epoxy Resin Bisphenol A (BPA). **American Journal Of Engineering Research (ajer)**. [s.i.], p. 144-154. 2018.
- GABBI, Renan et al. Modelagem Matemática de Elementos Sensores Usando Grafite. **Proceeding Series of The Brazilian Society of Applied And Computational Mathematics**, Gramado, Rs, v. 5, n. 1, p.1-7, 14 abr. 2017. SBMAC. <http://dx.doi.org/10.5540/03.2017.005.01.0391>.
- MINELA, Sthefani Neves. **EXTENSOMETRIA: ESTUDO E APLICAÇÃO**. 2017. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Sc, 2017.
- PEDRALI, Patricia Carolina et al. Graphite Piezoresistive Sensors in Polymeric Substrates. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, [s.l.], v. 5, n. 10, p.105-109, 2018. AI Publications. <http://dx.doi.org/10.22161/ijaers.5.10.14>.