

## **MODELAGEM MATEMÁTICA E FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS PIEZORESISTIVAS USANDO GRAFITE<sup>1</sup>**

**Graciane Hammes<sup>2</sup>, Luiz Antonio Rasia<sup>3</sup>, Antonio Carlos Valdiero<sup>4</sup>.**

<sup>1</sup> Pesquisas da dissertação de mestrado em Modelagem Matemática

<sup>2</sup> Bolsista Unijui, mestranda em Modelagem Matemática; E-mail: graciane.hammes@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Orientador, professor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, líder do grupo de pesquisa “Projeto em Sistemas Mecânicos, Mecatrônica e Robótica”; E-mail: rasia@unijui.edu.br

<sup>4</sup> Co-orientador, professor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, líder do grupo de Pesquisa “Projeto em Sistemas Mecânicos, Mecatrônica e Robótica”; E-mail: valdiero@unijui.edu.br

### **Introdução:**

Frente ao cenário da Era tecnológica e da sociedade da informação, as pesquisas científicas estão, cada vez mais, voltadas a este ramo, a inovação. Partindo desta realidade, observa-se que a modelagem matemática vem ganhando seu devido reconhecimento e relevância em relação a sua aplicabilidade, pautando por descrever situações reais em simulações computacionais.

Diante deste cenário este trabalho objetiva a realização da modelagem matemática e a simulação computacional para validação do modelo de piezoresistores baseados na estrutura do carbono, por meio de experimentos e testes a serem realizados. Propõe-se o desenvolvimento de dispositivos sensores, observando as propriedades mecânicas, elétricas e térmicas do material de estudo.

Sensores, transdutores e atuadores são dispositivos de tecnologia de ponta, detectam ações/estímulos e reagem a estes, realizando a conversão desta energia em outro tipo de sinal. Os sensores de tensão, deformação e extensômetros destacam-se pela possibilidade de interação com o meio ambiente e com o ser humano. Basicamente, estes sensores convertem um sinal mecânico em um sinal elétrico e, portanto; a importância em estudar suas propriedades tais como: resistividade e sensibilidade, visando aperfeiçoar o material para a confecção do dispositivo final.

A literatura mostra diversos estudos, experimentos e validações computacionais realizadas a partir de sensores piezoresistivos fabricados com Silício, DLC, ITO, entre outros. A motivação para este trabalho está em estudar o estado da arte para a implementação de dispositivos com um “novo” material, no caso, o Carbono, elemento químico que pertence à família 14 da tabela periódica, com número atômico 6 e massa atômica 12 u.

### **Metodologia:**

A ideia deste trabalho consiste em implementar elementos sensores piezoresistivos aplicando a modelagem matemática. A partir deste objetivo, realizou-se pesquisas e estudos relacionados a diferentes materiais (Silício, DLC, Carbono e o Grafite), explorando as propriedades elétricas, térmicas e mecânicas. Neste contexto, observando a estrutura destes materiais, optou-se por explorar o Carbono, visto ser um material orgânico, alternativo, de baixo custo, disponível em abundância na natureza, além de ser biocompatível e bom condutor de corrente elétrica.

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Jornada de Pesquisa

Para a fabricação de um dispositivo sensor é fundamental ter o conhecimento prévio da sua utilização, aplicação ou função, para a definição e escolha do substrato mais adequado à determinada aplicação. Neste sentido, o estudo objetiva a obtenção da resistividade elétrica do material e da sensibilidade mecânica ou Gauge Factor (GF), utilizando a flexão de uma viga engastada. Para este fim, faz-se necessário o desenvolvimento de um sistema flexível e, com isso, optou-se por um substrato de papel (isolante) e um substrato de poliéster (isolante), uma vez que a estrutura destes materiais permitem a aplicação de forças, provocando uma tensão/stress mecânico e/ou a compressão do dispositivo.

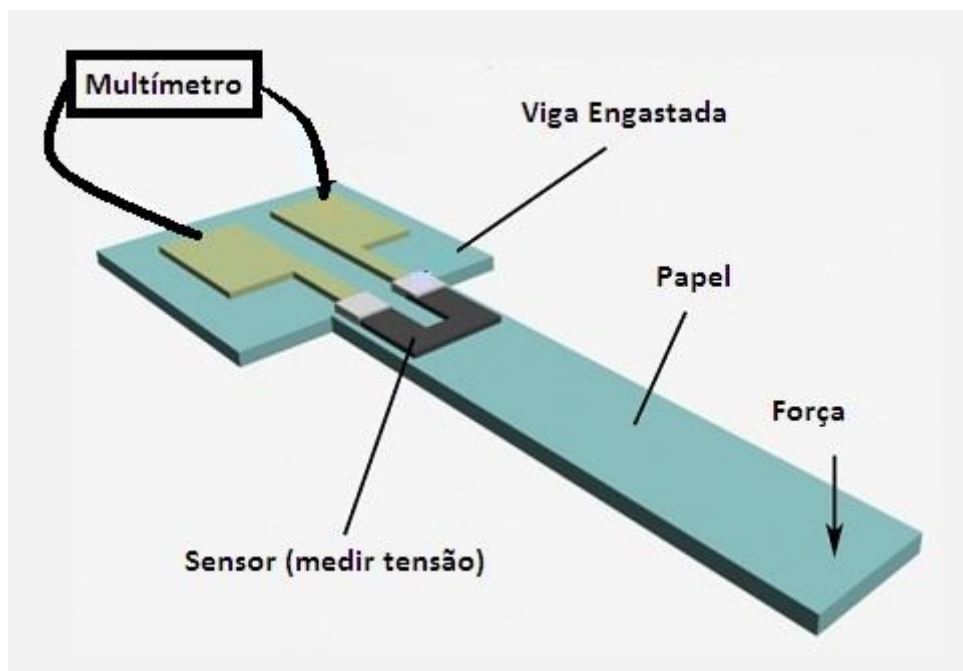
Utilizando traços/riscos de grafite (grafita processada), de diferentes níveis de dureza, projeta-se a estrutura do dispositivo, que são diretamente depositados no substrato escolhido. Com a deposição do filme de carbono no substrato (papel A4 ou poliéster), realiza-se a conexão dos fios de metal na área de contato elétrico (PAD), nos quais serão ligadas as ponteiros metálicas do multímetro (FILHO et al, 2003). Esta estrutura é engastada em uma estrutura fixa, localizado na base da viga, e tem a função de detectar as tensões mecânicas. Quando aplicado uma força na viga engastada, os átomos de carbono/grafite se expandem ou comprimem sensivelmente, induzindo uma mudança na resistência elétrica.

Rasia (2009) mostra que em uma viga engastada tanto o esforço mecânico ( $T$ ), como a força de contato ( $F$ ), dependem do módulo de elasticidade ( $E$ ) e da geometria do material (comprimento ( $L$ ), largura ( $W$ ) e espessura ( $t$ )) da qual é feita. A distância entre o centro do piezoresistor e o ponto onde a força é aplicada é dada pelo valor de  $x$  e a distância entre o centro do piezoresistor e a extremidade engastada da viga é dada pelo valor de  $d$ . As equações resultantes são lineares e garantem uma relação linear entre o esforço e a deformação mecânica.

Figura 1: Representação esquemática do método da viga engastada

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Jornada de Pesquisa



Fonte: próprio autor

### Resultados e Discussões:

Todos os materiais são constituídos por átomos. Existem diferentes teorias que explicam a natureza e a estrutura organizacional dos átomos. A estrutura dos materiais varia com as suas propriedades, dependendo do arranjo dos seus átomos, o que também define a sua estrutura cristalina de rede.

Os materiais sólidos podem ser classificados, basicamente, em: amorfos, policristalinos e cristalinos. Os materiais cristalinos são aqueles que os átomos se encontram ordenados, sobre longas distâncias atômicas. Um material policristalino é um sólido constituído de uma infinidade de cristais, denominados grãos ou cristalitos, com orientações e dimensões aleatórias, fortemente unidas entre si. E um sólido amorfo é aquele onde aparentemente os átomos não possuem um ordenamento em seu arranjo atômico (SILVA, 2014).

O carbono é um elemento que apresenta diferentes formas cristalinas quando submetido a diferentes condições de pressão e temperatura. Esse fenômeno é conhecido como Alotropia, do grego allos (outro) e tropos (maneira). Quando os átomos do carbono organizam-se de diferentes maneiras, formam novos materiais, tais como o grafite.

A estrutura geométrica das moléculas e sólidos formados por átomos de carbono está relacionada ao caráter espacial de suas ligações, ou seja, a coordenação de cada átomo. As propriedades elétricas e mecânicas do grafite e do diamante, por exemplo, são resultados da configuração de suas ligações atômicas. As propriedades mecânicas estão associadas às ligações sigma, que respondem pelas propriedades elásticas do material, e as propriedades eletrônicas são as ligações pi, responsáveis pela mobilidade eletrônica (DECHANDT, 2005).

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Jornada de Pesquisa

A sensibilidade mecânica de um filme semicondutor é alterada principalmente pela resistividade do material, mobilidade, temperatura e concentração de impurezas. Já os coeficientes de piezoresistência dependem da temperatura e da concentração de dopantes.

Na configuração de piezoresistores é de suma importância avaliar as propriedades elétricas, térmicas e mecânicas do material. Ao configurar dispositivos sensores, estes podem acarretar tanto num aumento como uma diminuição da resistividade, dependendo do tipo de material e da direção sobre a qual é aplicada a força ou tensão mecânica (RASIA, 1997).

As propriedades piezoresistivas para filmes com estrutura cúbica são representadas pelo coeficiente piezoresistivo, e é explicado pela transferência de elétrons. Esta teoria relaciona a mudança da resistividade, com a redistribuição dos elétrons em um diagrama de superfícies de energia. Este mecanismo está associado à deformação mecânica que é aplicada ao material em uma determinada direção cristalográfica. Este processo causa uma transferência de elétrons que resulta em uma mobilidade, anisotrópica (RASIA, 2009). Assim, o efeito piezoresistivo pode ser definido pela Equação (1):

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho} = \pi_{ijkl}T_{kl}$$

Onde,  $T_{kl}$  é o esforço mecânico na estrutura do material, observando a relação existente entre o esforço mecânico e a deformação mecânica que é dada pelo módulo de elasticidade  $E$ , sendo pela Equação (2):

$$T_{ij} = E\varepsilon_{ijkl}$$

A maior sensibilidade é obtida por meio do coeficiente piezoresistivo que introduz o módulo de elasticidade do material, conforme mostra a Equação (3):

$$GF = \pi_{ij}E$$

O coeficiente piezoresistivo é uma propriedade intrínseca do material considerado ou escolhido como elemento sensor e será foco de determinação neste trabalho.

As consequências da temperatura podem implicar sobre quaisquer outras propriedades físicas referentes aos sensores piezoresistivos. Segundo Thomazini e Albuquerque (2011), as principais causas da variação da resistência com a temperatura, são o nível de dopante e a forma do perfil. Conforme a concentração de dopantes aumenta a mobilidade diminui com a elevação da temperatura.

Outro parâmetro importante para a fabricação de piezoresistores é o comportamento do TCGF com as variações de temperatura (RASIA, 2009), definidas pela Equação (4),

$$TCGF = \frac{GF(\theta) - GF(\theta_{amb})}{GF(\theta_{amb})(\theta - \theta_{amb})}$$

Sendo TCGF o coeficiente de variação do Gauge Factor com a temperatura, &#952;. O conhecimento deste coeficiente permite melhorar a compensação dos piezoresistores em um transdutor de esforço (mesmo acelerômetros) ou em sensores de pressão. Este parâmetro é importante para obter uma saída de sinal do elemento sensor independente da temperatura, conforme sugere Rasia (2009).

Utilizando modelos matemáticos de primeira e segunda ordem, pode-se obter considerações quanto ao funcionamento de dispositivos sensores de pressão, acelerômetros e outros sistemas eletromecânicos complexos (RASIA, 2009). Neste trabalho será aplicado o modelo geométrico dado por Gniazdowski, Koszur e Kowalski (2000) como sugere a Equação (5).

$$R = R_{ref} + \rho_0 \pi_l \int_{x_d}^{x_u} T_l(x) dx + \rho_0 \pi_t \int_{x_d}^{x_u} T_t(x) dx$$

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XX Jornada de Pesquisa

Para determinar a variação da piezoresistência com a temperatura, aplica-se ao modelo do piezoresistor de 2ª ordem, dado pela Equação (6):

$$R(\theta) = R_{\theta_{ref}} (1 + \alpha \theta + \beta \theta^2)$$

sendo o R o valor do piezoresistor na temperatura ambiente de referencia e alfa e beta, os TCRs de primeira e segunda ordem em função da temperatura.

Frente a este contexto, objetiva-se desenvolver experimentos com o aquecimento do elemento sensor, utilizando o arranjo de um Hot Plate. O piezoresistor será aquecido com temperatura controlada, na faixa da temperatura ambiente até 100 °C, variando de 10 °C em 10 °C. Este arranjo permite verificar a variação da piezoresistência em função da temperatura, observando o comportamento deste material quando passa por diferentes processos e variação da temperatura.

O perfil e a uniformidade do filme de grafite depositado será investigado usando um microscópio modelo Dino-lite AM-313T. Esta metodologia, objetiva a identificação da morfologia do filme de grafite por meio da microscopia óptica, possibilitando análises que comprovem a presença ou não, de uniformidades no filme piezoresistivo. A existência destas “amostras livres”, com eventuais deformações ou desníveis formadas no processo de construção do piezoresistor podem interferir na resistência final do elemento sensor, na condutividade e na qualidade do material produzido.

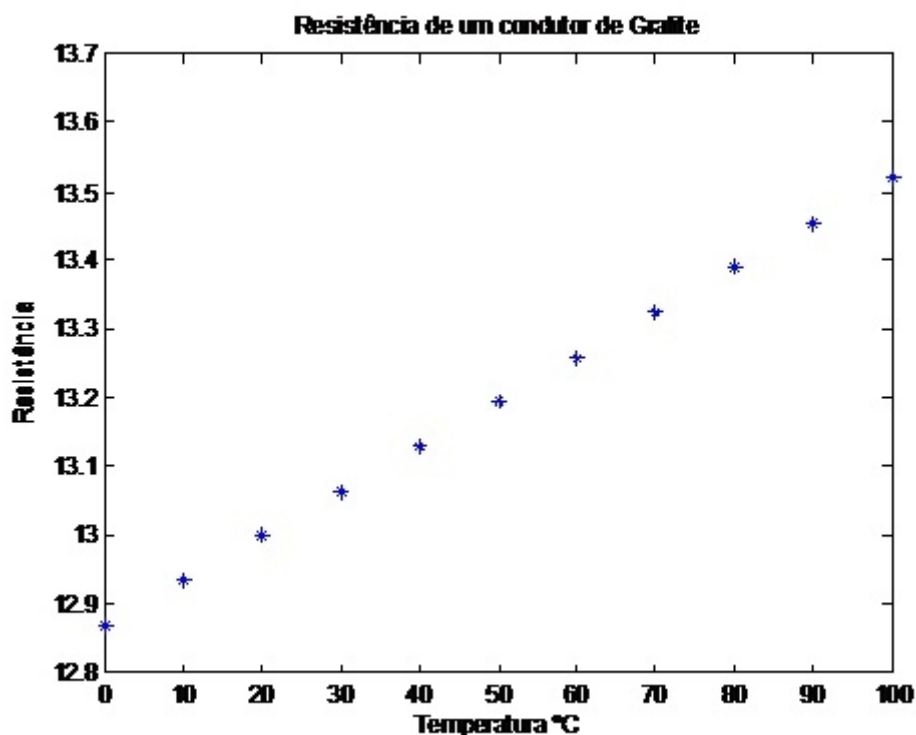
**Conclusões:**

Foi realizada uma simulação computacional no MatLab para representar a resistência do piezoresistor de grafite em função da temperatura. O passo de integração da temperatura foi de 10 °C, a resistência a 20 °C deste material é de 13 ohms.m² e o coeficiente de temperatura é 0.0005 °C<sup>-1</sup>. Os primeiros resultados estão mostrados na Figura 2.

Figura 2: Resistência do piezoresistor de grafite em função da temperatura

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Jornada de Pesquisa



Fonte: (Próprio autor – MatLab)

Este trabalho apresentou os primeiros resultados sobre a estrutura dos materiais, em especial, a do carbono bem como o seu funcionamento quando aplicados à tecnologias relacionadas à dispositivos eletrônicos. Além disso, pautar-se-á por identificar e conhecer as propriedades deste material, bem como estudar modelos matemáticos utilizados para projetar sensores piezoresistivos visando a aplicação futura em dispositivos sensores encapsulados.

Espera-se que este trabalho contribua com os estudos já desenvolvidos nesta área. Como perspectivas futuras, visualiza-se a validação do modelo matemático e dos testes experimentais.

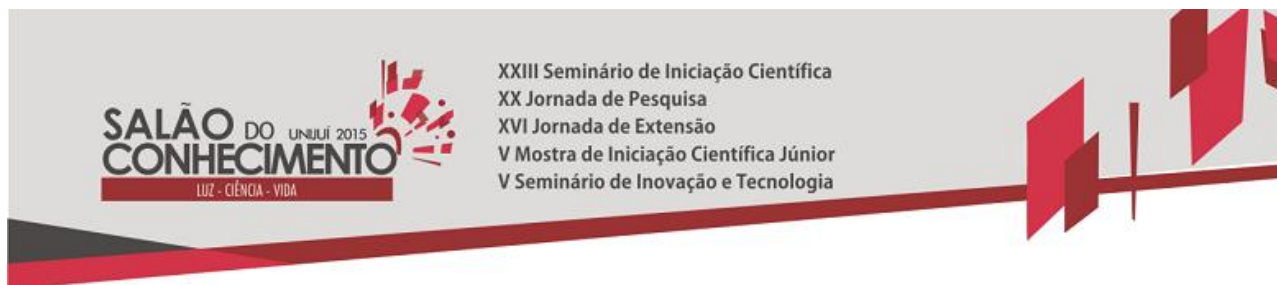
**Palavras-Chave:**

Elementos Sensores Piezoresistivos; Carbono; Modelagem Matemática

**Referências:**

DECHANDT, Simone Tod. Características de filmes duros de carbono amorfo DLC depositados em polietileno de peso molecular ultra alto empregado em próteses ortopédicas. Curitiba – PR, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

FILHO, João Bernardes da Rocha; COELHO, Suzana; SALAMI, Marcos; MACIEL, Marília Rangel; SCHRAGE, Pedro Ubirajara. Resistores de Papel e Grafite: Ensino Experimental de Eletricidade Com Papel e Lápis. Porto Alegre – RS, 2003.



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XX Jornada de Pesquisa

GNIAZDOWSKI, Z.; KOSZUR, J.; KOWALSKI, P. Conditioning of piezoresistance coefficient extraction. 7ª International Conference MIXDES, Polônia, 2000.

RASIA, Luiz Antônio. Estudo e Aplicação das Propriedades Elétricas, Térmicas e Mecânicas de Materiais Amorfos Piezoresistivos em Transdutores de Pressão / L.A. Rasia. Ed. Ver. – São Paulo, 2009.

RASIA, L. A. Elementos Piezoresistivos para Sensores de Pressão com Tecnologia CMOS. 1997. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SILVA, Vitor de Almeida. Arranjos Atômicos. 2014.

Disponível em:

<[http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/16678/material/Aula%2006%20-%20-%20Arranjos%20At%C3%B4micos%20\(PUC\)%20-%20Engenharia%20-%202014.pdf](http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/16678/material/Aula%2006%20-%20-%20Arranjos%20At%C3%B4micos%20(PUC)%20-%20Engenharia%20-%202014.pdf)>

Acesso em: 27 de março de 2015

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. Sensores industriais: fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora Érica, 2011.