

# Elementos Sensores Piezoresistivos de Grafite em Substratos Poliméricos

Patricia Carolina Pedrali, MSc<sup>1</sup>, Luiz Antonio Rasia, PhD<sup>1</sup>, Antonio Carlos Valdiero, PhD<sup>1</sup>, Mariana Fraga, PhD<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, Brasil, email: [patricia.pedrali@unijui.edu.br](mailto:patricia.pedrali@unijui.edu.br), [rasia@unijui.edu.br](mailto:rasia@unijui.edu.br), [valdiero@unijui.edu.br](mailto:valdiero@unijui.edu.br),

<sup>2</sup>Universidade Brasil, São Paulo - SP, Brasil, email: [mafraga07@hotmail.com](mailto:mafraga07@hotmail.com)

**Resumo**– Neste trabalho são apresentados os resultados da caracterização por microscopia digital, microscopia eletrônica de varredura e EDX das propriedades mecânicas do grafite 2B depositado pelo processo GOP – Graphite on Paper em substrato de papel tipo A4. As diferentes propriedades e a estrutura de rede do papel escolhido, para o desenvolvimento de dispositivos sensores, visam aplicações práticas em projetos de dispositivos eletromecânicos tipo MEMS.

**Palavras chave** - MEMS, Sensores Piezoresistivos, Efeito Piezoresistivo, Polímeros.

## I. INTRODUÇÃO

Desde a sua descoberta a celulose e seus derivados tem sido utilizada nos mais variados segmentos. Nos últimos anos uma vasta gama de dispositivos e sensores baseados em papel foi desenvolvida, incluindo medidores de tensão mecânica, strain gauges, supercapacitores, armazenamento de energia entre outros. Dispositivos a base de celulose para detecção de radiação eletromagnética na faixa de infravermelho média também estão sendo produzidos de acordo com [1]. A maioria dos trabalhos na área se concentram em métodos de produção de sensores e exploração de novas aplicações [2]. Este trabalho tem por objetivo caracterizar o grafite depositado sobre o papel A4, que será utilizado como elemento condutor na obtenção de um dispositivo piezoresistivo e seus resultados comparados futuramente com os resultados obtidos por simulação numérica computacional.

## II. ELEMENTO SENSOR PIEZORESISTIVO SOBRE SUBSTRATO DE PAPEL

### A. Elemento sensor piezoresistivo

Um sensor tem por principal finalidade a conversão de energia entre os diferentes domínios, ou seja, reagir a um sinal e convertê-lo em outro tipo de sinal. Os sensores piezoresistivos são um exemplo de transdutores passivo, pois necessitam de uma excitação externa que pode ser originada por uma viga engastada ou uma fonte de corrente elétrica [3]. De acordo com a literatura [4], existem vários métodos para mensurar forças considerando as alterações das dimensões dos materiais devido às tensões mecânicas aplicadas. Os sensores piezoresistivos tipo strain gauges são muito utilizados para este fim. A piezoresistividade consiste na mudança reversível da resistividade que um material apresenta devido a um esforço mecânico aplicado [5]. O sensor piezoresistivo tem uma dependência direta da propriedade do material do qual é feito. Em termos elétricos e térmicos as propriedades mais

significativas para fabricação dos elementos sensores são aqueles relacionados com a resistividade e mobilidade dos portadores de carga. Em termos mecânicos considera-se a densidade, a expansão térmica, módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson [6].

Para generalizar as propriedades do material a ser usado como elemento sensor definiu-se o coeficiente piezoresistivo,  $\pi_{ij}$ , como entidade que considera todas as propriedades mensuráveis do material. Estes coeficientes estão relacionados com os níveis de concentração de impurezas dopantes, orientação cristalográfica do material, temperatura e, conseqüentemente, com o tipo de condutividade de acordo com [7]. Estes parâmetros são importantes para os processos tecnológicos de fabricação dos dispositivos sensores e atuadores uma vez que estão relacionados com a sensibilidade dos dispositivos [3, 8, 9]. O coeficiente piezoresistivo é uma propriedade intrínseca do material considerado e escolhido como elemento sensor, sendo possível ajustar a sua magnitude, ou seja, aperfeiçoar as propriedades físicas do material [6]. O efeito piezoresistivo é definido pela equação (1),

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho} = \pi_{ijkl} T_{kl} \quad (1)$$

Onde,  $\pi_{ijkl}$ , é o tensor de coeficiente piezoresistivo, uma propriedade intrínseca do material escolhido como elementos sensor e que pode ser ajustada por técnicas específicas de dopagem. O esforço mecânico na estrutura do material é dado por,  $T_{kl}$ , sendo,  $\Delta\rho_{ij}/\rho$ , a razão de variação da resistividade elétrica quando o material é submetido a forças externas de tração ou deformações mecânicas.

Em geral, as estruturas dos filmes depositados sobre os substratos possuem uma espessura muito menor que a espessura do próprio substrato, portanto, as tensões mecânicas são transmitidas integralmente do substrato ao filme de acordo com a teoria das pequenas deflexões. A rugosidade da superfície e do substrato também podem produzir efeitos de histerese térmica e mecânica através da criação de esforços mecânicos concentrados os quais produzem perdas de sensibilidade e de aderência dos filmes depositados.

Uma deformação num dado material, exercida ao longo de uma determinada direção, provoca sempre alterações em todas as dimensões. O efeito piezoresistivo pode ser descrito expressando a mudança da resistência elétrica,  $\Delta R$ , de forma macroscópica em função do esforço mecânico, da deformação

mecânica,  $\epsilon$ , e do fator de sensibilidade ou gauge fator,  $GF$  dado pela equação (2),

$$GF = \frac{\Delta R}{R \epsilon} \quad (2)$$

O fator de sensibilidade é dependente da orientação cristalográfica do material e está relacionado ao coeficiente piezoresistivo através do módulo de Young,  $E$ , dado pela equação (3),

$$GF = \pi_{ij} E \quad (3)$$

A relação entre a mudança nas dimensões do sensor e a sensibilidade é dada através do coeficiente de Poisson através da equação (4),

$$GF = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho}{\rho \epsilon} \quad (4)$$

Onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson e o termo  $1+2\nu$  representa a alteração nas dimensões do material e  $\epsilon = \Delta L / L_0$  é a deformação mecânica.

### B. Características do Grafite

O grafite é formado por átomos de carbono que se ligam entre si por ligações covalentes. Cada átomo de carbono está ligado a três outros átomos de carbono. Um átomo está disposto de tal forma que as suas ligações são os vértices de um triângulo, e o átomo ocupa o centro do triângulo. Assim são formadas folhas de átomos do carbono ligados entre si por ligações covalentes. As camadas de átomos que formam o grafite estão ligadas umas nas outras por ligações muito frágeis. Em geral o grafite é um mineral mole, sendo um condutor elétrico, possui aplicações em eletrônica, como em eletrodos e baterias. O grafite é a forma cristalina mais estável apresentada pelo carbono. É composto por infinitas camadas de átomos de carbono hibridizados em ligações tipo  $sp^2$ . Em cada camada, chamada de folha de grafeno, um átomo de carbono se liga a três outros átomos, formando um arranjo planar de hexágonos fundidos [10].

A hibridização do tipo  $sp^2$  acontece com átomos de carbono que formam uma ligação dupla. A hibridização do carbono advém de uma ligação dupla e duas ligações simples. O grafite é um bom condutor de corrente elétrica, no entanto não possibilita a condução térmica. Seu ponto de fusão é de aproximadamente  $3550^\circ\text{C}$  e de ebulição  $4200^\circ\text{C}$ . A densidade gira em torno de  $2,26 \text{ g/cm}^3$ . Pode ser encontrado em três formas: amorfa, cristalina e em lâminas. O grafite pode ser encontrado na forma natural ou produzido, forma sintética. O grafite natural é uma das formas alotrópicas do carbono encontradas na natureza, já a sintética é produzida industrialmente com uso de altas temperaturas e pressão, utilizando matérias primas como o coque de petróleo ou a antracita [10].

**Digital Object Identifier:** (to be inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

### C. Processo de deposição do filme de grafite

A fig.1 ilustra as etapas de processo de deposição dos elementos sensores piezoresistivo sobre o substrato por esfoliação mecânica de grafite 2B, processo conhecido como GOP – Graphite on Paper [11,12] produzidos através de traços de lápis.

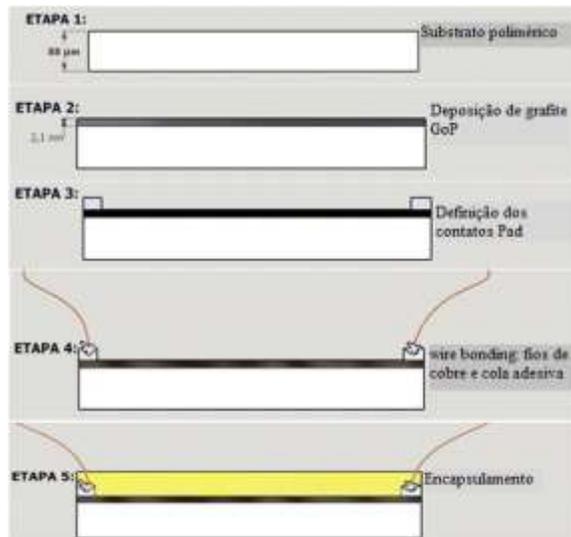


Fig. 1 Etapas do processamento do elemento sensor piezoresistivo de grafite.

A Fig. 2 mostra uma fotografia do piezoresistor obtida através de um microscópio digital Dino-lite modelo AM-313T. Para finalização dos sensores, fez-se o encapsulamento com cola epoxy.



Fig.2 Fotografia digital do piezoresistor de grafite sobre papel.

### C. Caracterização mecânica do grafite

Nas fig. 3-5 é possível observar as lâminas de grafite entre as fibras do papel A4.

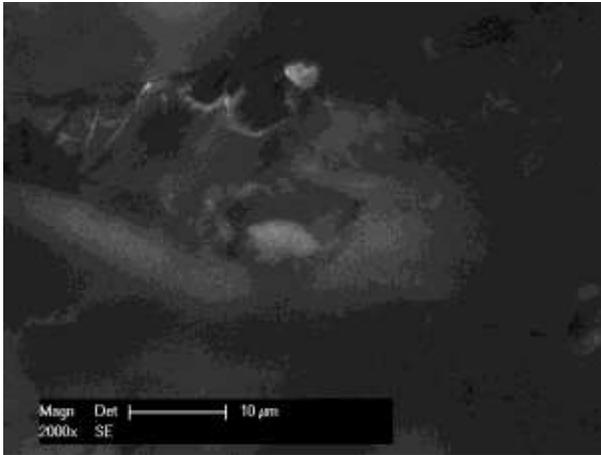


Fig.3 Microscopia digital para o grafite sobre papel. Aumento de 150x.

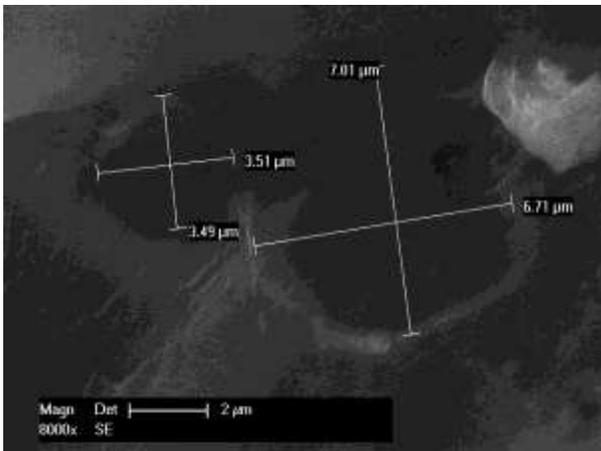


Fig.4 Microscopia electronica de varredura para o grafite sobre papel. Aumento de 2000x.



Fig.5 Microscopia electronica de varredura para o grafite sobre papel, determinação do tamanho das lâminas. Aumento de 8000x

Na fig. 6 é mostrada a análise por EDX para as lâminas de grafite. As imagens foram obtidas com microscopio digital Keyence serie VK-X e Microscopio electronico de varredura Philips modelo XL 30 ESEM. Esta análise mostra a composição do grafite usado para fabricação dos elementos sensores.

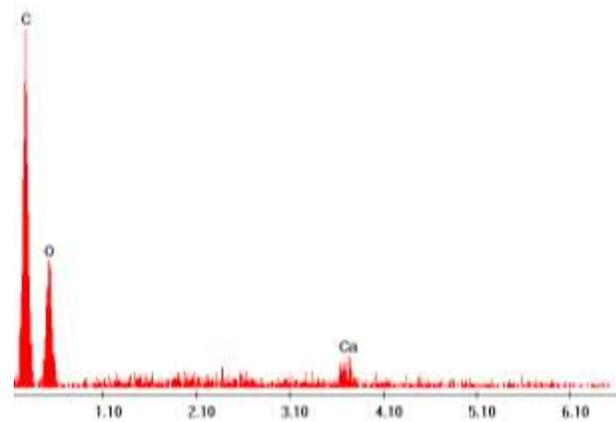


Fig.6 Análise por EDX para as lâminas de grafite.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As caracterizações realizadas para o grafite depositado sobre substrato polimerico, papel A4, através de microscopia digital possibilitou visualizar e identificar as laminas de grafite aderidas entre as fibras do papel bem como outras particulas, consideradas impurezas. Além disso, a microscopia eletrônica de varredura permitiu que se mensurasse o tamanho dessas partículas, variando entre 3,5 µm e 7 µm. A análise por EDX pode confirmar a composição das partículas constituintes do filme, sendo o carbono o principal componente encontrado. Os resultados cindem com o levantamento bibliográfico possibilitando dados seguros e confiáveis para a fabricação de sensores piezoresistivos.

#### REFERENCES

- [1] [1] J. Al Gimenez, J. M. Y. Limon e J. M. Seminario. "Paper-Based Photoconductive Infrared Sensor". J. Phys. Chem. C 2011, 115, 18829–18834.
- [2] [2] S. K. Mahadeva, W. Konrad e B. Stoeber "Paper as a Platform for Sensing Applications and Other Devices: A Review" ACS Appl. Mater. Interfaces, pp. 1-65, 2015. DOI: 10.1021/acsami.5b00373
- [3] D. Thomazini; P. U. B de Albuquerque, "Sensores industriais: fundamentos e aplicações". São Paulo: Editora Érica, 2011.
- [4] L. A Rasia, G., Leal, L.L. Koberstein, Furlan H., M., Massi M.A Fraga., Design and Analytical Studies of a DLC Thin-Film Piezoresistive Pressure Microsensor. In: Figueroa-García J., López-Santana E., Villa-Ramírez J., Ferro-Escobar R. (eds) Applied Computer Sciences in Engineering. WEA 2017. Communications in Computer and Information Science, vol 742. Springer, Cham.
- [5] L. H. V. Vlack, "Propriedades de Materiais Cerâmicos". Edgard Blücher, São Paulo 1973.

- [6] 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 Method. In: XVI Brazil MRS Meeting, 2017, Gramado. Proceedings SBPMat. Rio de Janeiro - Brazil: SBPMat, 2017. v. 1. pp. 828-828.
- [7] M. Akbar, "Interface circuit for piezoresistive pressure sensors". Dissertation. Department of Electrical Engineering. University of Michigan, 1991.
- [8] LI Maisel, LI e R. Glang, "Handbook of thin film technology". McGraw-Hillbook Company, 1983.
- [9] Z. Gniazdowski, P. Kowalski., "Practical approach to extraction of piezoresistance coefficient". Institute of Electron Technology, Warsaw (Poland) 1998.
- [10] W. D. Callister, "Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução". Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- [11] X.Y. Liu, O'Brien M., M. Mwangi, X.J. Li, and G. M. Whitesides. "Paper-based Piezoresistive MEMS force Sensors". Conference Paper in Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) February 2011 DOI: 10.1109/MEMSYS.2011.5734379.
- [12] Toan Dinh, a Hoang-Phuong Phan,a Dzung Viet Dao,a;b Peter Woodfield,b Afzaal Qamar,a and Nam-Trung Nguyen."Graphite on Paper as Material for Sensitive Thermoresistive Sensors." Journal of Materials Chemistry C, 2015.