

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

**HISTÓRICO DOS TRABALHOS RELACIONADOS A SENSORES
PIEZORESISTIVOS DESENVOLVIDOS PELO GRUPO DE PESQUISA
GPMAD¹
HISTORY OF PIEZORESISTIVE SENSORS-RELATED WORKS IN THE
GPMAD RESEARCH GROUP**

Cristiane Sonego Rolim², Luiz Antônio Rasia³

¹ Pesquisa Institucional desenvolvida no Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul-UNIJUI, pertencente ao Grupo de Pesquisa em Materiais e Dispositivos - GPMaD.

² Aluna do curso de Mestrado em Modelagem Matemática da Unijuí, crisonego@hotmail.com

³ Professor Doutor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Orientador, rasia@unijui.edu.br

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados das dissertações desenvolvidas pelo grupo de pesquisa GPMaD - Grupo de Pesquisa em Materiais e Dispositivos do Programa de Pós Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, nos últimos seis anos, voltadas a analisar o comportamento de sensores piezoresistivos através da modelagem matemática e das técnicas de caracterização. As técnicas de caracterização foram utilizadas para extrair dados experimentais dos sensores e a modelagem matemática foi usada como modelo prático para projeto de piezoresistores, além de servir para análise dos resultados obtidos. Os dados experimentais dos trabalhos foram tratados em programa computacional específico no intuito de analisar graficamente o comportamento dos sensores e, assim, estabelecer a relação com os modelos matemáticos disponíveis na literatura. Portanto, o artigo traz uma interpretação das linearidades e não-linearidades dos dados extraídos dos sensores estudados utilizando a modelagem matemática, contribuindo para o desenvolvimento de trabalhos na área.

Palavras-chave: Piezoresistivos; Sensores; Modelagem matemática.

Abstract

This paper presents the results of the dissertations developed in the research group GPMaD - Materials and Devices Research Group of the Graduate Program in Mathematical Modeling of the Northwestern Regional University of Rio Grande do Sul for six years, aimed at analyzing the behavior piezoresistive sensors through mathematical modeling and characterization techniques. The characterization techniques were used to extract experimental data from the sensors and the mathematical modeling was used as a practical model for piezoresist design, as well as to analyze the obtained results. The experimental data of the works were treated in a specific computer program in order to graphically analyze the behavior of the sensors and thus establish the relationship with the mathematical models available in the literature. Therefore, the article provides an interpretation of the linearities and nonlinearities of the data extracted from the

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

sensors studied using mathematical modeling, contributing to the development of work in the area.

Keywords: Piezoresistive; Sensors; Mathematical modeling.

1 INTRODUÇÃO

Quando se busca aprofundamento nos estudos a respeito de sensores, chega-se a um interesse comum no qual se define como dispositivos que respondem a um estímulo físico e transmitem o impulso resultante. Essa tecnologia e desenvolvimento seguem sempre ativos, buscando constantemente inovações e novas descobertas.

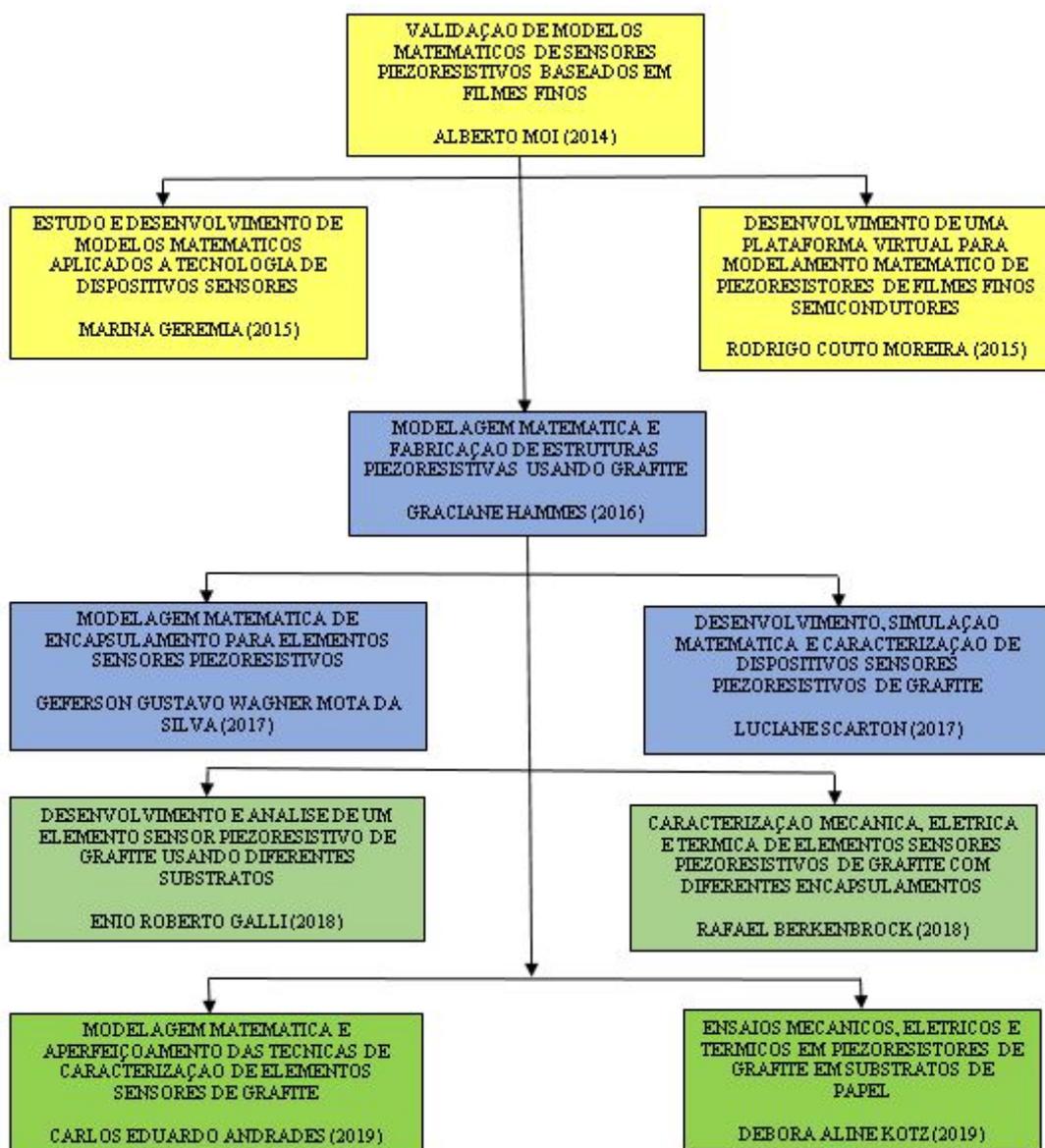
Na atualidade, o efeito piezoresistivo é determinante no contexto das tecnologias, utilizado no campo de MEMS (MicroElectroMechanical Systems) para uma ampla variedade de aplicações nas áreas de engenharias, robótica, automobilística, agricultura, ciências biomédicas e áreas afins. Neste trabalho, é usado como elemento sensor de esforços mecânicos tipo strain gauges o papel como substrato e grafite com elemento modulador da corrente elétrica.

Com isso, faz-se necessário um conhecimento cada vez mais aprofundado e abrangente do fenômeno piezoresistivo, objetivando a descoberta de novos materiais que respondam a esse efeito, com mais eficácia e menor custo.

Este artigo apresenta uma revisão teórica sobre os estudos relacionados a sensores piezoresistivos desenvolvidos no decorrer de seis anos pelo grupo de pesquisa, mostrados no diagrama da Figura 1.

Figura 1- Diagrama esquemático de trabalhos correlatos

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa



Fonte: Próprio Autor (2019)

2 METODOLOGIA

Para a interpretação do comportamento dos sensores, todos os trabalhos do grupo utilizaram modelos matemáticos disponíveis na literatura. Com modelos matemáticos de primeira e segunda ordem, pode-se obter considerações quanto ao funcionamento de elementos sensores, sejam eles de pressão, acelerômetros e demais sistemas eletromecânicos complexos (RASIA, 2009).

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Nos trabalhos analisados foi utilizado o modelo matemático apresentado na Equação 1, caracterizado para sensores piezoeistivos, proposto por Gniazdowski, Latecki e Kowalski (2000).

$$R = R_{ref} + \rho_0 \pi_l \int_{x_d}^{x_u} T_l(x) dx + \rho_0 \pi_t \int_{x_d}^{x_u} T_t(x) dx \quad (1)$$

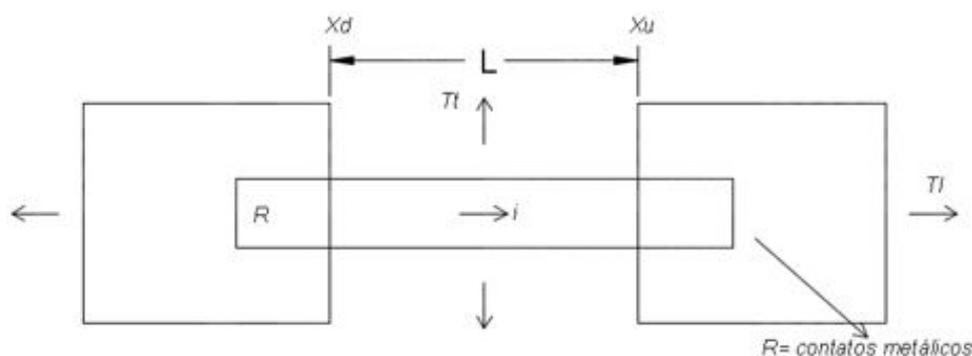
O modelo é composto por variáveis fundamentais que determinam a alteração da resistência elétrica. A Tabela 1 a seguir mostra a definição das variáveis que compõem o modelo e a Figura 2 apresenta o modelo físico de um piezoresistor.

Tabela 1 - Definição das Variáveis do modelo matemático

Sigla	Definição	Unidade de medida
R	Resistência elétrica após a aplicação das tensões mecânicas	$[\Omega]$
R_{ref}	Resistência elétrica inicial de referência	$[\Omega]$
ρ_0	Resistividade do material depositado	$[\Omega/m]$
π_l	Coefficiente piezoresistivo longitudinal	$[m^2/N]$
π_t	Coefficiente piezoresistivo transversal	$[m^2/N]$
x_d x_u	Posições inicial e final ocupada pelo piezoresistor	$[m]$
T_l	Tensão mecânica longitudinal	$[N/m^2]$
T_t	Tensão mecânica transversal	$[N/m^2]$

Fonte: Adaptado de Gniazdowski et al. (2000)

Figura 2- Modelo Físico de um Piezoresistor



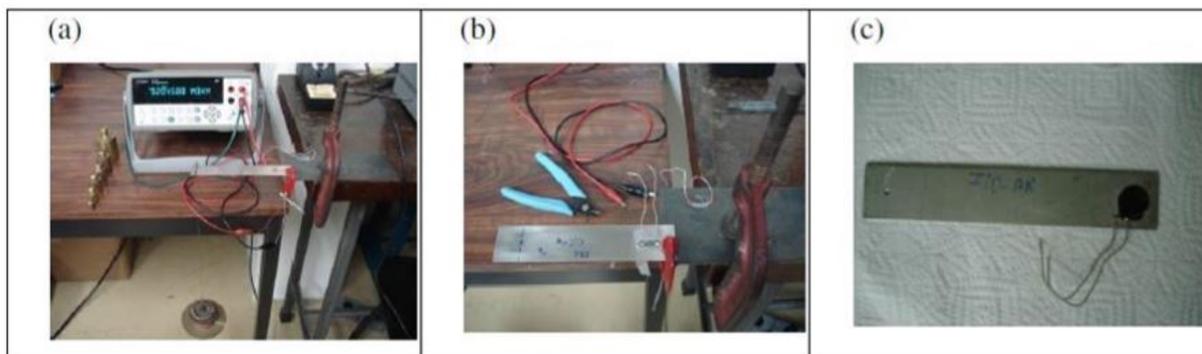
Fonte: Adaptado de Gniazdowski (2000)

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Alberto Moi (2014) revisou os estudos sobre a caracterização do efeito piezoresistivo em filmes finos de materiais semicondutores, em especial, o silício tipo P e tipo N, através de modelos matemáticos e simulação, a partir de dados experimentais, para validar e aperfeiçoar os modelos matemáticos existentes na literatura para elementos sensores piezoresistivos baseados em filmes finos semicondutores. No trabalho foi modelado o comportamento eletromecânico e térmico de um piezoresistor feito de silício policristalino tipo P e os resultados foram comparados com os mostrados pela literatura, para o silício. Os coeficientes piezoresistivos foram obtidos através do método da viga engastada.

Marina Geremia (2015) estudou a teoria do efeito piezoresistivo e as suas propriedades em dois tipos de materiais com estrutura amorfa, conforme ilustra a Figura 3, o carbono semelhante ao diamante (DLC) e o óxido de índio dopado com estanho (ITO): fator de sensibilidade ao esforço mecânico, coeficiente de variação de piezoresistência com a temperatura, coeficientes piezoresistivos longitudinais e transversais, comportamento térmico e piezoresistivo com a utilização de dopantes, entre outras. Também foi feito um modelamento matemático, para esses dois tipos de materiais, com a adequação das equações usuais para os sensores feitos de silício monocristalino visando comparar as diferentes características dos materiais fornecendo os parâmetros e relações matemáticas para implementação de transdutores piezoresistivos (RASIA, 2009).

Figura 3 - Fotografia do arranjo experimental para caracterização mecânica dos filmes de DLC e ITO



Fonte: Geremia (2015)

Rodrigo Couto Moreira (2015) mostrou o desenvolvimento de um software, rotulado como SimuPi, ilustrado na Figura 4, para simular o modelamento matemático de elementos sensores piezoresistivos, para modelos de primeira e segunda ordem, clássicos da literatura, os quais, são indispensáveis para o desenvolvimento de elementos sensores baseados no efeito piezoresistivo do silício. Foi estudado a forma de elaboração do programa, escolhido sua linguagem de programação e elaborado seus diagramas detalhados de requisitos e de funcionamentos. A plataforma de testes foi desenvolvida na linguagem de programação Java. O SimuPi mostrou-se condizente com a sua proposta, apresentando gráficos e resultados equivalentes aos obtidos em testes laboratoriais a partir da análise das propriedades do silício com base em modelos

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

matemáticos.

Figura 4 - Janela de informação sobre a resistência

The image shows a software window titled "Cálculo da Resistência". At the top right, the formula $R = \frac{\rho \cdot L}{t \cdot W} = R_s \frac{L}{W}$ is displayed. Below the formula is a diagram of a rectangular resistor with length L and width W . The window contains several input fields: "L (comprimento) De" and "Até", "W (largura)", "Rs (Resistência de Folha)", "# (Numero de quadrados)", "ρ (Resistividade)", "t (espessura)", and "Mobilidade μ". There are two "Calcular" buttons: one for "Rs" and one for "R". A "Gerar Gráfico N por ρ" button is also present. The window includes a "Precisão" field set to 11 and a note: "Obs: Calcula-se considerando uma temperatura ambiente (300k). 'q' tem valor de 1,6E-19".

Fonte: Moreira (2015)

Graciane Hammes (2016) realizou pesquisas com o intuito de investigar diferentes materiais para a fabricação de elementos sensores piezoresistivos, em especial o Grafite, sugerindo sua aplicação em dispositivos sensores em substituição a outros materiais cujos processos de fabricação são mais complexos quando comparados ao utilizado no trabalho. Foram projetados e montados elementos sensores de grafite visando sua caracterização mecânica, elétrica e térmica depositado sobre substrato polimérico, conforme ilustra a Figura 5, visando sua utilização na fabricação de dispositivos sensores piezoresistivos. Estas análises foram muito importantes para que se tenha um conhecimento efetivo do comportamento do elemento sensor, além de oportunizar ao projetista otimização das propriedades do material para as aplicações em dispositivos sensores.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Figura 5 - Arranjos experimentais da obtenção da piezoresistência submetida a diferentes tensões mecânicas



Fonte: Hammes (2016)

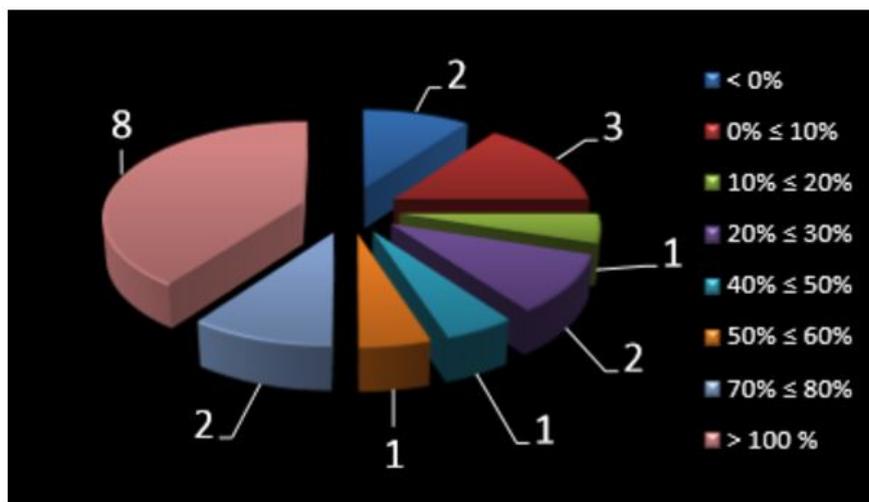
Geferson Gustavo Wagner Mota Da Silva (2017) realizou um estudo teórico e experimental de elementos sensores piezoresistivos de filmes de grafite obtidos pelo processo de esfoliação mecânica sobre substrato de papel (GoP) visando adequar encapsulamentos a partir de diferentes materiais, sobre propriedades elétricas, térmicas e mecânicas de elementos sensores, com a presença de dois tipos de encapsulamento (resina de baixo custo e resina Epoxi + Poliaminoamida).

O estudo compreendeu um levantamento bibliográfico sobre a utilização de sensores na indústria e na sociedade, enfocou à teoria da piezoresistividade, elencou diferentes tipos de sensores piezoresistivos existentes, apresentou os materiais comumente utilizados para a fabricação de piezoresistores e descreveu alguns processos de deposição e encapsulamento.

Foi feito um estudo experimental sobre a utilização do Carbono, sob a forma alotrópica do grafite como material base para elemento piezoresistor usando o método da viga engastada (Cantilever) para analisar as propriedades térmicas, elétricas e mecânicas do material, com e sem a presença de encapsulamentos conforme ilustra a Figura 6.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Figura 6 - Representação gráfica do percentual de aumento das resistências nominais após processo de annealing.



Fonte: Silva (2017)

Luciane Scarton (2017) desenvolveu elementos sensores piezoresistivos baseados em carbono na forma de grafítica, depositado sobre polímero flexível, em especial, na caracterização e análise das propriedades térmicas, elétricas e mecânicas do filme. Avaliou a presença de regularidade e/ou irregularidades nos modelos matemáticos empregados para validar o filme de grafite utilizando uma bancada experimental. As análises gráficas dos principais resultados obtidos indicaram aplicabilidade prática do filme como elemento sensor. Foi utilizado a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para analisar a rugosidade superficial do filme, composição química qualitativa e quantitativa antes e após annealing térmico.

Assim evidenciou que nas amostras analisadas a superfície do filme de grafite apresentou maior uniformidade após o "annealing thermal", mostrando que ocorreu um ajuste nas propriedades do material indicando que a técnica utilizada apresentou os resultados esperados, permitindo afirmar a viabilidade do uso do grafite em sensores piezoresistivos, pois apresentou fatores de sensibilidade reportados na literatura.

Enio Roberto Galli (2018) trabalhou com diferentes encapsulamentos para aperfeiçoar a caracterização do efeito piezoresistivo de elementos sensores fabricados com grafite, descreveu as etapas para confecção e posterior caracterização e análise das propriedades térmicas, elétricas e mecânicas do filme de grafite depositado em substratos flexíveis, papel A4, papel vegetal e polipropileno, utilizando o método da viga engastada, através do processo de esfoliação mecânica do grafite. Os dados obtidos, a partir de testes, antes e após a aplicação do processo de recozimento térmico, foram realizados com auxílio de uma bancada experimental.

Foram realizadas simulações, a partir das equações estabelecidas pela literatura, onde foram implementadas através do software de código aberto SciDavis. Essas simulações permitiram a elaboração de valores nominais estimados para os coeficientes piezoresistivos, resistividade, fator

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

de sensibilidade e a dependência da tensão mecânica. Foram confeccionados 90 elementos sensores piezoresistivos de grafite para os experimentos, sendo 45 posicionados no sentido longitudinal e 45 no sentido transversal, onde 15 em substrato de papel, 15 em papel vegetal e 15 em polipropileno. Todos foram submetidos ao método da viga engastada, com aplicação da variação da tensão mecânica, antes e após o recozimento térmico das amostras.

Foi realizada a caracterização elétrica, térmica e mecânica do filme de grafite de dureza 2B, através do método de esfoliação mecânica sobre uma viga engastada. O grafite foi depositado sobre substrato flexível, visando sua utilização na fabricação de dispositivos sensores piezoresistivos.

Rafael Berkenbrock (2018) descreve o efeito piezoresistivo no grafite, uma forma alotrópica do carbono, validando sua aplicação em elementos sensores em substituição a outros materiais cujos processos de fabricação são mais complexos e de custos superiores. Foram projetados e fabricados elementos sensores de grafite visando a sua caracterização mecânica, elétrica e térmica, a partir da análise de três diferentes tipos de encapsulamento: Epóxi-Bisfenol A, Esmalte e Acetato de Vinila.

Percebeu-se que os elementos sensores desenvolvidos com grafite em substratos poliméricos possuem grande potencial, se caracterizam por serem de baixo custo, extremamente simples, leves, flexíveis, portáteis, estáveis e reutilizáveis, não gerando impacto ambiental potencialmente negativo durante seu processamento e utilização. O processo utilizado para confecção e manuseio dos elementos sensores foi relativamente simples, mas com cuidados extremos em cada uma de suas etapas, tendo criteriosa atenção às condições do ambiente, a integridade da estrutura física das amostras e a ordenada coleta dos dados, permitindo aos elementos sensores confeccionados desempenho experimental semelhante aos propostos pela literatura.

Carlos Eduardo Andrades (2019) apresentou uma proposta de pesquisa voltada a analisar o comportamento elétrico, térmico e mecânico de sensores piezoresistivos de grafite através das técnicas de caracterização e da modelagem matemática. Elas foram utilizadas para extrair dados experimentais dos sensores e a modelagem matemática foi usada para interpretar esses dados através de equações matemáticas. As técnicas de caracterização dos sensores foram aperfeiçoadas através da construção do protótipo de uma máquina Hot Plate com capacidade de aquecimento de até 100 °C e, também, através do protótipo de uma máquina de ensaio de tração e compressão com capacidade de força de até 95 N. O desenvolvimento dos protótipos teve objetivo de diminuir custos com instrumentos de medidas e extrair dados mais significativos pelo fato dos mesmos portarem medidores de grandezas integrados aos aparelhos. Aplicando diferentes temperaturas e tensões mecânicas nos sensores de grafite obteve-se dados experimentais ainda não coletados em trabalhos anteriores por insuficiência de instrumentalização. Para confeccionar os sensores foram utilizados materiais de baixo custo que são facilmente encontrados no mercado tais como o papel A4, grafite 2B, fios de cobre esmaltado, entre outros.

Débora Aline Kotz (2019) descreve o efeito piezoresistivo no grafite, uma forma alotrópica do carbono, validando sua aplicação em elementos sensores com menor custo se comparado com a tecnologia tradicional do silício. Foram projetados e fabricados elementos sensores de grafite em um substrato flexível, o papel A4, visando a sua caracterização mecânica, elétrica e térmica.

Foi utilizado o método de tração, através do processo de esfoliação mecânica do grafite. Foram

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

realizados testes em uma bancada experimental, onde os dados foram extraídos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considera-se que estes trabalhos assumem um papel precursor para o tema proposto, pois são de grande valia para a sequência e o emprego de técnicas alternativas para a melhoria dos resultados obtidos na construção de elementos sensores.

O modelo matemático da Equação (1) foi aplicado em plataforma computacional, nos trabalhos realizados no grupo, utilizando dados experimentais reais de Hammes (2016), Scarton e Silva (2017), Galli e Berkenbrock (2018) e Andrades e Kotz (2019). A Tabela 2 mostra os dados.

Tabela 2 - Dados Experimentais

Grandeza	Hammes (2016)	Scarton/Silva (2017)	Galli/Berkenbrock (2018)	Andrades/Kotz (2019)	Unidade de medida
R_{ref}	53236,18	2624240	5056,9926	31287000	[Ω]
ρ_0	$1,904 \times 10^{-6}$	$5,05 \times 10^{-6}$	$4,3923 \times 10^{-7}$	$6,26 \times 10^9$	[Ωm]
$\bar{\pi}_i$	$3,82 \times 10^{-11}$	$4,8 \times 10^{-10}$	$5,302 \times 10^{-10}$	$1,08 \times 10^{-8}$	[m ² /N]
$\bar{\pi}_t$	$-4,15 \times 10^{-11}$	$-1,71 \times 10^{-11}$	$2,7854 \times 10^{-10}$	$6,79 \times 10^{-9}$	[m ² /N]
\bar{T}_i	$1,07 \times 10^{10}$	4×10^{10}	$9,357 \times 10^8$	$7,424 \times 10^6$	[N/m ²]
\bar{T}_t	$2,78 \times 10^9$	$4,17 \times 10^{10}$	$2,43 \times 10^8$	$1,856 \times 10^6$	[N/m ²]
x_d	0	0	0	0	[m]
x_u	0,0627	0,005	0,005	0,005	[m]
ϑ	0,25	0,26	0,25	0,25	
\overline{GF}_i	10,17	9,62-125	15,6	18,50	
\overline{GF}_t	-7,79	-53,61- -4,47	8,2	27,91	

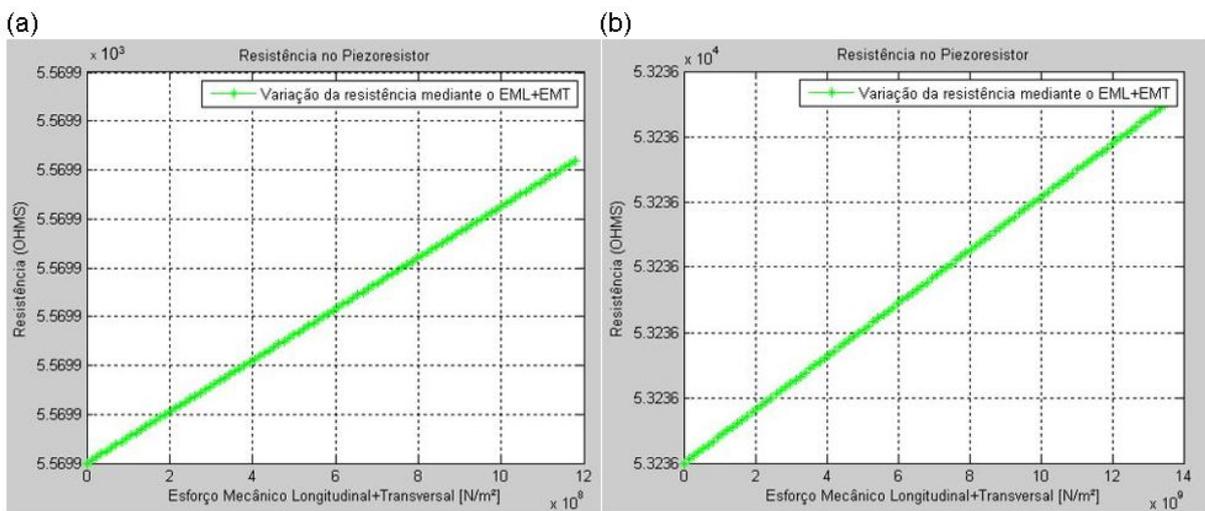
Fonte: Adaptado de Hammes (2016), Scarton e Silva (2017), Galli e Berkenbrock (2018) e Andrades e Kotz (2019)

Os valores de $(\bar{\pi}_i)$, $(\bar{\pi}_t)$, (\bar{T}_i) e (\bar{T}_t) são valores médios das amostras dos trabalhos. A divergência entre os valores comparando os resultados se dá pelo fato da utilização de métodos de caracterização diferentes nos trabalhos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

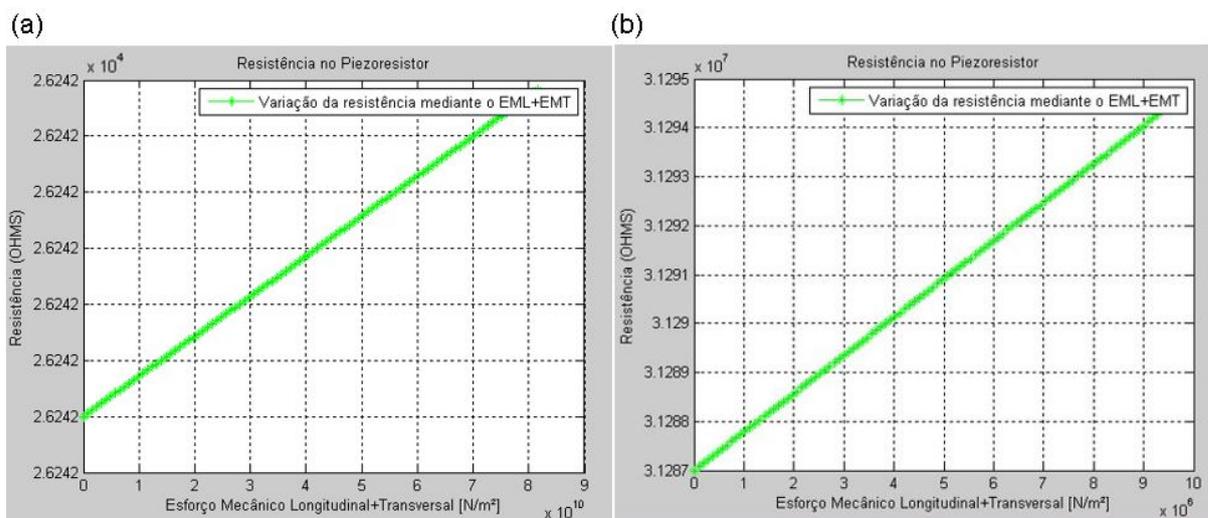
Os resultados dos dados experimentais no modelo mostram que os valores lineares, como ilustra as Figuras 7 e 8.

Figura 7- Resultado de (a) Galli/Berkenbrock (2018) e (b) Hammes (2016)



Fonte: Próprio Autor (2019)

Figura 8- Resultado de (a) Scarton/ Silva (2017) e (b) Andrades/Kotz (2019)



Fonte: Próprio Autor (2019)

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

A análise das Figuras 7 e 8 mostra a tendência linear apresentada pelos experimentos indicando também a ordem de grandeza dos valores medidos.

Os resultados apresentados indicam que o grafite pode ser usado para o desenvolvimento de elementos sensores piezoresistivos.

REFERÊNCIAS

ANDRADES, C.E. Modelagem Matemática e Aperfeiçoamento das Técnicas de Caracterização de Elementos Sensores de Grafite. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijui, Ijuí, 2019.

BERKENBROCK, R. Caracterização Mecânica, Elétrica e Térmica de Elementos Sensores Piezoresistivos de Grafite com Diferentes Encapsulamentos. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijui, Ijuí, 2018.

GALLI, E. R. Desenvolvimento e Análise de um Elemento Sensor Piezoresistivo de Grafite Usando Diferentes Substratos. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijui, Ijuí, 2018.

GEREMIA, M. Estudo e desenvolvimento de modelos matemáticos aplicados a tecnologia de dispositivos sensores. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijui, Ijuí, 2015.

GNAZDOWSKI, Z. et al. Conditioning of piezoresistance coefficient extraction. 7ª International Conference MIXDES. Polônia. 2000.

HAMMES, G. Modelagem matemática e fabricação de estruturas piezoresistivas usando grafite. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijui, Ijuí, 2016.

KOTZ, D. A. Ensaio Mecânicos, Elétricos e Térmicos em Piezoresistores de Grafite em Substrato de Papel. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijui, Ijuí, 2019.

MOI, A. Validação de Modelos Matemáticos de Sensores Piezoresistivos Baseados em Filmes Finos. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijui, Ijuí, 2014.

MOREIRA, R. C. Desenvolvimento de Uma Plataforma Virtual para Modelamento Matemático de Piezoresistores de Filmes Finos Semicondutores. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijui, Ijuí, 2015.

RASIA, L.A. 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.

Bioeconomia:
DIVERSIDADE E RIQUEZA PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

SALÃO DO UNIJUI 2019
CONHECIMENTO

21 a 24 de outubro de 2019

XXVII Seminário de Iniciação Científica
XXIV Jornada de Pesquisa
XX Jornada de Extensão
IX Seminário de Inovação e Tecnologia

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

SCARTON, L. Desenvolvimento, simulação matemática e caracterização de dispositivos sensores piezoresistivos de grafite. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijuí, Ijuí, 2017.

SILVA, G. G. W. M. da. Modelagem matemática de encapsulamento para elementos sensores Piezoresistivos. Dissertação de Mestrado, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2017.