



Evento: XXXIV Seminário de Iniciação Científica

Modelagem, Caracterização de Materiais, Desenvolvimento e Prototipagem de Dispositivos Eletromecânicos para a Indústria, Saúde e Bioengenharia¹

Pedro Henrique Bronzatti², Luiz Antonio Rasia³

¹ Projeto de pesquisa desenvolvido na Unijuí; com financiamento da agência CNPq.

² Estudante do curso Engenharia Mecânica, bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - PIBIC/CNPq.

³ Professor orientador do projeto Modelagem, Caracterização de Materiais, Desenvolvimento e Prototipagem de Dispositivos Eletromecânicos para a Indústria, Saúde e Bioengenharias.

INTRODUÇÃO

A busca constante por novas tecnologias e pela redução de custos de produção é uma realidade no setor industrial, motivando inovações no desenvolvimento de sensores piezoresistivos, que são dispositivos amplamente utilizados para a medição precisa de força, pressão e outros parâmetros físicos de acordo com THOMAZINI (2020). A fabricação comercial tradicional desses componentes costuma envolver processos complexos e onerosos, o que impulsionou o interesse pela técnica Graphite on Paper (GoP) estudada por PEDRALI et al. (2018), SILVA (2017) e RASIA(2017). Essa abordagem, fundamentada na esfoliação mecânica de grafite sobre um substrato de papel, destaca-se como uma alternativa promissora devido ao seu baixo custo, flexibilidade de design e simplicidade de produção. Contudo, a manufatura estritamente manual desses dispositivos esbarra em desafios de qualidade e repetibilidade, sendo o problema mais crítico a formação de bolhas de ar durante o encapsulamento, falha que compromete severamente a confiabilidade do sensor.

Para superar essas limitações operacionais, a integração dos conceitos de manufatura aditiva (impressão 3D) e automação apresenta-se como uma solução viável e eficiente. Nesse contexto, este artigo descreve a modernização de um equipamento laboratorial por meio de um retrofit aplicado a uma mini fresadora CNC, convertendo-a em uma máquina de prototipagem automatizada projetada especificamente para a técnica GoP. O trabalho detalha as etapas de desenvolvimento do projeto, que incluem a modelagem em software CAD, a impressão 3D em material polimérico de um sistema de troca rápida de ferramentas com implementação de módulos intercambiáveis para a deposição controlada de grafite e material

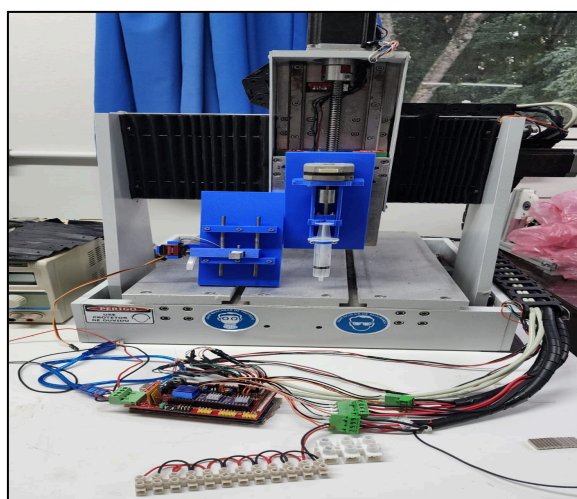


de encapsulamento. Além disso, o estudo apresenta a avaliação prática do equipamento adaptado, comparando diferentes agentes selantes para aperfeiçoar o encapsulamento, atestando, assim, a viabilidade técnica de transição do processo manual para um método semiautomatizado mais rigoroso e confiável.

METODOLOGIA

O desenvolvimento metodológico da investigação fundamentou-se no método de Análise e Melhoria de Processos (MAMP), estruturado através do ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act) de acordo com MARIANI (2005), com o intuito de otimizar a transição da manufatura manual para a automatizada. A primeira fase do projeto consistiu numa revisão bibliográfica, seguida da modelação tridimensional paramétrica com recurso ao software CAD *SolidWorks*. Nesta etapa virtual, foram desenhados três componentes essenciais para a adaptação do eixo Z da fresadora CNC: um suporte base servindo como uma placa de ferramenta para acoplamento rápido e dois módulos intercambiáveis destinados, respectivamente, à deposição de grafite e ao encapsulamento polimérico conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1: Módulos em PLA de troca rápida para confecção dos sensores GoP.



Fonte: O Autor (2026).



Com o equipamento de *retrofit* calibrado, a metodologia prosseguiu para a produção dos sensores utilizando a técnica *Graphite on Paper* (GoP). O processo de fabrico seguiu cinco etapas sequenciais: preparação dos substratos (papel sulfite e cartão), deposição orientada do grafite por esfoliação mecânica, definição dos contatos elétricos, ligação dos fios de cobre e o encapsulamento final. A automatização destas etapas visou garantir uma reprodutibilidade que a operação humana não consegue assegurar com consistência.

Por fim, para avaliar e melhorar a fase crítica do enclausuramento, foi delineada uma bateria de testes experimentais utilizando o módulo de ferramenta equipado com uma seringa de 10 ml. Foram testados três materiais selantes: Poliacetato de Vinila (PVA), Acetato de Polivinila (PVAc) e cola de silicone líquida.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Operacionalmente, a máquina adaptada permitiu a execução da técnica *Graphite on Paper* (GoP) com um controle sobre a velocidade e a força normal aplicada durante a esfoliação mecânica do grafite, mantida no intervalo ideal de 0,1 N a 2,0 N. Este controle garantiu uma deposição orientada e homogênea sobre os substratos de papel.

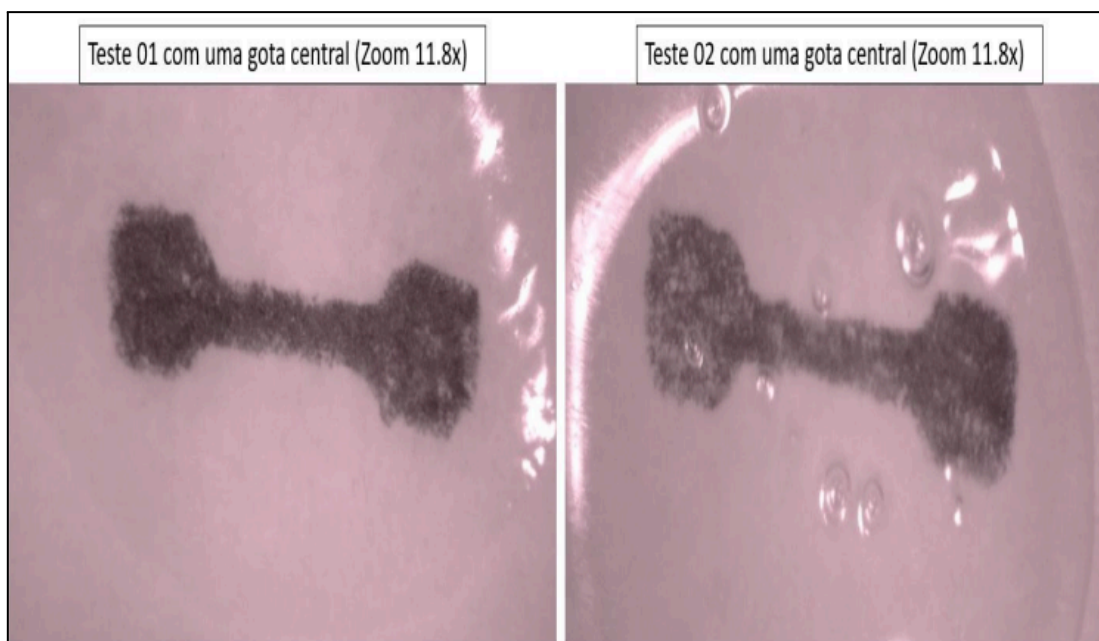
No que diz respeito ao encapsulamento dos sensores piezoresistivos, os ensaios práticos evidenciaram diferenças substanciais no comportamento dos materiais testados. A cola de silicone líquida, devido à sua elevada viscosidade, mostrou ser inadequada para o processo automatizado de extrusão por seringa, uma vez que, propiciou a retenção de bolhas de ar no interior da camada protetora. Por sua vez, o Acetato de Polivinila (PVAc), embora apresentasse características razoáveis de selagem, exibiu uma opacidade acentuada após o período de cura, o que dificultou a inspeção visual do elemento sensor. Em contrapartida, o Poliacetato de Vinila (PVA) destacou-se como o material de excelência para esta aplicação, oferecendo não só a transparência necessária para a avaliação de qualidade, mas também uma excelente integridade estrutural e aderência ao substrato.

A discussão e análise das metodologias de deposição permitiram otimizar em definitivo a parametrização do módulo de extrusão. Observou-se, experimentalmente, que a utilização de agulhas acopladas à seringa exigia um esforço mecânico excessivo sobre o



êmbolo, dinâmica que, inadvertidamente, introduzia ar na conduta e promovia a formação das indesejadas bolhas de ar. Concluiu-se, assim, que os resultados mais eficientes são obtidos aplicando o PVA conforme ilustra a Figura 2 de forma concentrada, extrudido diretamente do bocal da seringa sem recurso a agulhas adaptadoras.

Figura 2: Fotografias em microscópio digital dos testes de aplicação de PVA sobre os sensores GoP.



Fonte: O Autor (2026).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo mostrou a viabilidade técnica e econômica de modernizar um equipamento obsoleto em desuso, transformando uma mini fresadora CNC num sistema semi-automatizado para a prototipagem de sensores piezoresistivos. O *retrofit* mecânico e eletrônico, aliado à manufatura aditiva para a criação de um sistema de troca rápida de ferramentas, garantiu precisão operacional, evidenciada pela reduzida margem de erro dimensional das peças impressas. A transição do processo de fabricação manual para o semiautomatizado permitiu um controle das variáveis de esfoliação do grafite, assegurando repetibilidade. A validação do Poliacetato de Vinila (PVA) extrudido diretamente, mostrou



ser um dos métodos mais eficazes e homogêneos para proteger os dispositivos sensores, antes do encapsulamento final em PLA. Conclui-se, assim, que a integração entre automação, impressão 3D e materiais de baixo custo resulta numa metodologia robusta e acessível, abrindo novas perspectivas para a produção escalável de sensores flexíveis com elevado grau de confiabilidade.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. CAD. piezoresistivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MARIANI, Celso Antonio. **Método PDCA e Ferramentas da Qualidade no Gerenciamento de Processos Industriais: Um Estudo de Caso.** RAI - Revista de Administração e Inovação, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 110-126, 2005.
- PEDRALI, Patricia Carolina et al. **Graphite Piezoresistive Sensors in Polymeric Substrates.** *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, v. 5, n. 10, p. 105-109, 2018. *(Fundamental para explicar a técnica GoP).*
- RASIA, L. A. et al. **Desenvolvimento e caracterização de elementos sensores piezoresistivos em substrato polimérico.** *13º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica.* Lisboa, Portugal, 2017. *(Referência essencial sobre o comportamento piezoresistivo e substrato).*
- SILVA, G. G. W. M. Da. **Modelagem matemática de encapsulamento para elementos sensores Piezoresistivos.** UNIJUÍ, 2017. *(Base teórica para a problemática e solução das bolhas de ar).*
- THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. **Sensores industriais.** Recife, PE: Editora Saraiva, 2020. *(Contextualização da aplicação e importância dos sensores).*