



Evento: XXXIV Seminário de Iniciação Científica

DESENVOLVIMENTO DE ENCAPSULAMENTOS PARA DISPOSITIVOS SENSORES E IOT DE GRAFITE SOBRE PAPEL

Bruno Henrique Ceretta², Luiz Antonio Rasia³

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

² Estudante do curso Engenharia Mecânica, bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - PIBIC/UNIJUÍ.

³ Professor orientador do projeto Implementação de um Lote Piloto de Sensores Piezoresistivos de Grafite em Substrato de Papel e Elastômeros para IoT - Edital PQG 2023,

INTRODUÇÃO

Os sensores piezoresistivos de grafite sobre papel (Graphite on Paper - GoP) constituem uma alternativa de baixo custo para a fabricação de dispositivos flexíveis, em razão da simplicidade do processo de deposição do grafite, da flexibilidade do substrato e da possibilidade de integração a sistemas de monitoramento. Estudos anteriores demonstram a viabilidade de elementos sensores GoP e o desenvolvimento de equipamentos destinados à sua fabricação e aplicação em diferentes configurações (Rasia; Pedrali; Valdiero, 2018; Rasia et al., 2020; Rasia et al., 2021).

Apesar dessas vantagens, a utilização do papel como substrato torna necessária a adoção de estratégias de proteção contra umidade e agentes externos, especialmente quando o dispositivo é destinado a aplicações flexíveis e à Internet das Coisas (IoT). Nesse contexto, o encapsulamento com materiais poliméricos pode atuar como barreira protetora, desde que a camada depositada apresente espessura controlada e não comprometa a resposta mecânica do sensor.

Entre as técnicas aplicáveis à formação de revestimentos, o spin coating permite distribuir materiais líquidos sobre um substrato por ação centrífuga. A espessura resultante depende das condições de processamento, principalmente da rotação, do tempo de deposição, do volume aplicado e das propriedades do material. Trabalhos desenvolvidos na UNIJUÍ já relacionaram a rotação do equipamento à espessura de filmes obtidos por esse processo, fornecendo parâmetros para a continuidade dos estudos de encapsulamento (Ceretta, 2022; Ceretta et al., 2023).



Assim, este trabalho teve como objetivo aprimorar soluções de encapsulamento para sensores piezoresistivos GoP, com ênfase na deposição de resina de silicone por spin coating e no aperfeiçoamento de aparatos experimentais associados à fabricação e à futura integração dos sensores em dispositivos de monitoramento.

METODOLOGIA

Os ensaios de deposição foram realizados utilizando resina de silicone líquida, lâminas de vidro, seringa para aplicação do material, equipamento de spin coating e micrômetro com resolução de 0,01 mm. O aprimoramento dos componentes mecânicos do equipamento foi realizado por meio de modelagem tridimensional, com a finalidade de aumentar a estabilidade do conjunto e favorecer a repetibilidade das condições de ensaio.

Nos testes conduzidos durante o período da bolsa, cada lâmina foi fixada ao spin coater e recebeu aproximadamente 4 mL de silicone líquido. Em seguida, as amostras foram submetidas a rotações entre 1.000 e 4.000 rpm durante 30 s. Após a deposição, o material permaneceu em temperatura ambiente até a secagem, sendo posteriormente realizada a medição da espessura da camada formada. Entretanto, os resultados obtidos com o volume de 4 mL ainda se encontram em fase de organização e análise e, por esse motivo, não foram tabelados nesta etapa do trabalho.

Como referência para comparação do comportamento da espessura em função da rotação, foram utilizados os dados obtidos por Ceretta (2022), apresentados na Tabela 1. Esses resultados correspondem a ensaios realizados com 6 mL de silicone, tempo de 30 s e rotações entre 1.000 e 5.000 rpm. Dessa forma, a Tabela 1 possui caráter amostral e comparativo, servindo como referência para os ensaios em desenvolvimento, não representando os resultados obtidos com o volume de 4 mL utilizado neste trabalho.

Tabela 1 - Relação entre rotação e espessura da camada de silicone para 6 mL e 30 s

Volume (mL)	Rotação (rpm)	Tempo (s)	Espessura (µm)
6	1.000	30	130
6	2.000	30	80
6	3.000	30	50
6	4.000	30	40
6	5.000	30	30

Fonte: Adaptado de Ceretta (2022).



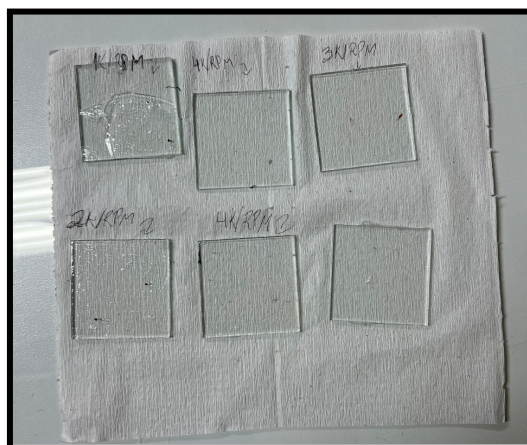
Além dos ensaios de revestimento, foram realizados ajustes mecânicos em uma máquina CNC empregada no desenvolvimento de dispositivos GoP e foi modelado, em ambiente CAD, um alojamento vestível destinado à integração futura dos sensores. Essas atividades foram tratadas como desenvolvimentos complementares à etapa de encapsulamento, com foco na padronização da fabricação e na integração do sistema.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de referência apresentados na Tabela 1 evidenciam a influência da rotação sobre a espessura da camada de silicone. Mantidos constantes o volume de 6 mL e o tempo de 30 s, o aumento de 1.000 para 5.000 rpm reduziu a espessura de 130 μm para 30 μm , correspondendo a uma diminuição aproximada de 76,9%. Observa-se, ainda, que a redução é mais acentuada nas faixas iniciais de rotação, passando de 130 μm a 80 μm entre 1.000 e 2.000 rpm e de 80 μm a 50 μm entre 2.000 e 3.000 rpm.

Esse comportamento fornece uma referência operacional importante para o encapsulamento de sensores GoP, pois demonstra que a espessura do revestimento pode ser ajustada pela rotação do processo. Nos ensaios realizados com 4 mL, o spin coater aprimorado permitiu executar a sequência prevista entre 1.000 e 4.000 rpm e produzir amostras destinadas à avaliação da camada depositada, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Amostras com revestimento de silicone obtidas em diferentes rotações



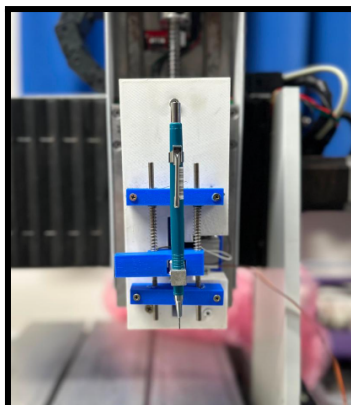
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A melhoria do conjunto mecânico associado à máquina CNC, apresentada na Figura 2, foi direcionada ao controle de posicionamento nos eixos X, Y e Z. A adequação do suporte



reduz a dependência de ajustes manuais e contribui para a continuidade do desenvolvimento de um processo mais padronizado para a fabricação de elementos sensores GoP. Nesta etapa, o equipamento permaneceu em fase de ajustes finais para posterior validação funcional.

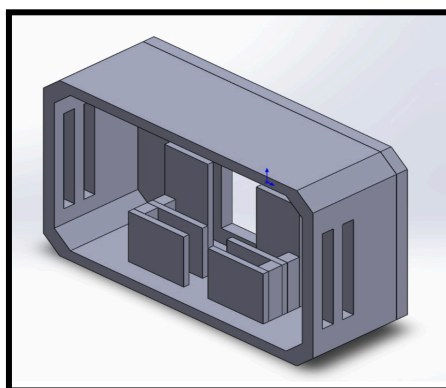
Figura 2 - Conjunto de ajuste implementado na máquina CNC



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Também foi desenvolvido o modelo tridimensional de um “relógio”, semelhante a um smartwatch, destinado à integração de sensores GoP e componentes eletrônicos, conforme apresentado na Figura 3. O protótipo foi projetado para ser utilizado no pulso, permitindo acomodar os componentes de forma compacta e possibilitando, futuramente, a realização de medições em tempo real durante o deslocamento do usuário. Nesta etapa, o desenvolvimento concentrou-se na modelagem e na definição do formato e do alojamento dos componentes, permanecendo o dispositivo em fase de desenvolvimento e posterior validação experimental.

Figura 3 - Protótipo tipo relógio medidor para alojamento de sensores GoP



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho comprovou a eficácia do Spin Coater aprimorado na deposição controlada de filmes finos de silicone, garantindo o encapsulamento seguro de sensores piezoresistivos (GoP). As melhorias implementadas no equipamento permitiram maior precisão e repetibilidade nos testes práticos. Ademais, a vivência na iniciação científica proporcionou forte desenvolvimento técnico em áreas como automação e modelagem, impulsionando a criação de novos protótipos laboratoriais. Todo o processo desenvolvido demonstrou alinhamento direto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, unindo inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental.

Palavras-chave: Spin Coater. Piezoresistores. Filmes finos. Iniciação Científica. Tecnologia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul pela bolsa de Iniciação Científica e Laboratorial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. CERETTA, A. G. Mecanismo de Revestimento Giratório - Spin Coating Mechanism. Relatório de Estágio em Engenharia Mecânica. 51 p. UNIJUI, 2022.
- [2]. CERETTA, R. K.; RASIA, L.A.; SCHWERTNER, L.; NEUMANN M. S. Modelagem Matemática para Controle de Espessura no Processo de Spin Coater. Salão do Conhecimento 2023. <https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/23755>
- [3]. RASIA, L. A.; ANDRADES, C. E. ; HECK, T. G. ; RASIA, J. Approach Pencil-on-Paper to Flexible Piezoresistive Respiration Sensor. In: Juan Carlos Figueroa-García; Yesid Díaz-Gutierrez; Elvis Eduardo Gaona-García; Alvaro David Orjuela-Cañón. (Org.). Communications in Computer and Information Science. 1ed.Switzerland: Springer International Publishing, 2021, v. , p. 290-298.
- [4]. RASIA, L. A.; PEDRALI, P. C. ; VALDIERO, A. C. . Characterization of Piezoresistive Sensors of Graphite on Paper Substrate. Proceedings of the LACCEI International Multi-conference for Engineering, Education and Technology, v. 1, p. 1-6, 2018. ISSN: 2414-6390 <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.327>
- [5]. RASIA, L. A.; VALDIERO, A. C. ; STEIN, E. O.; VALDIERO, C. A. Design of an Automatic Machine for Sensor Manufacturing by the GoP Technique. Proceedings of the 18th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, v. 1, p. 1-6, 2020.