



Formação de filmes finos orgânicos por *blade coating* para fabricação de transistores

Palavras-Chave: *Eletrônica Orgânica, Blade Coating, OTFTs.*

Autores(as):

Henrique Mariano Freitas, FEEC – UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). Marco Roberto Cavallari (orientador), FEEC - UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). Jose Enrique Eirez Izquierdo (coorientador), FEEC - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A Eletrônica Orgânica surge como uma alternativa promissora aos semicondutores tradicionais, permitindo o desenvolvimento de dispositivos flexíveis, vestíveis e de baixo custo, como OTFTs, OLEDs e sensores. Contudo, a fabricação desses dispositivos enfrenta desafios relacionados à qualidade e reprodutibilidade dos filmes finos orgânicos, especialmente quando produzidos por *spin coating*, técnica limitada pelo alto desperdício de material e pela impossibilidade de integrar múltiplos semicondutores em um mesmo substrato. Como solução, o *blade coating* tem se destacado por permitir deposição seletiva e eficiente, com uso reduzido de insumos e viabilidade para integração de diversos materiais. Essa técnica amplia as possibilidades de design e funcionalidade dos dispositivos, tornando-se estratégica para o avanço da eletrônica orgânica em aplicações industriais e sustentáveis.

METODOLOGIA:

A metodologia adotada no projeto envolveu o desenvolvimento completo do processo de fabricação e caracterização de filmes finos orgânicos por meio da técnica de *blade coating*. Foram utilizados substratos de vidro e silício com dimensões padronizadas de 1 x 1 polegada, escolhidos por sua estabilidade térmica, boa aderência dos filmes e compatibilidade com análises ópticas e elétricas subsequentes.

As soluções dos polímeros semicondutores P3HT e PBTTT-C14, ambos derivados de tiofeno, foram preparadas em diclorobenzeno (DCB). Para garantir homogeneidade, as soluções foram agitadas por 12 horas em temperatura ambiente e posteriormente aquecidas a 100 °C por 1 hora em hotplate imediatamente antes da deposição. Essa etapa assegura a dissolução completa e adequada viscosidade para formação do filme.

Os substratos passaram por limpeza meticulosa. Para o vidro, o protocolo envolveu ultrassom em solução de Extran com água deionizada, seguido por etapas de fervura em acetona e isopropanol, com secagens

intermediárias a jato de ar. No caso do silício, a etapa com detergente foi omitida para evitar reações indesejadas na superfície.

A deposição foi realizada com o equipamento Blade Coater BCC-02. Os substratos foram fixados à mesa por vácuo, com vedação dos furos para garantir estabilidade. A lâmina foi ajustada com altura e velocidade (5 mm/s), e a temperatura da mesa foi controlada para avaliar seu impacto na evaporação do solvente e na uniformidade do filme. Um diferencial do projeto foi o desenvolvimento de lâminas de aço dentadas, que permitiram a deposição de múltiplas faixas (*striped films*) no mesmo substrato, viabilizando a integração de diferentes semicondutores em uma única amostra – um avanço para aplicações em sensores multifuncionais. Segue na figura abaixo os filmes já depositados.

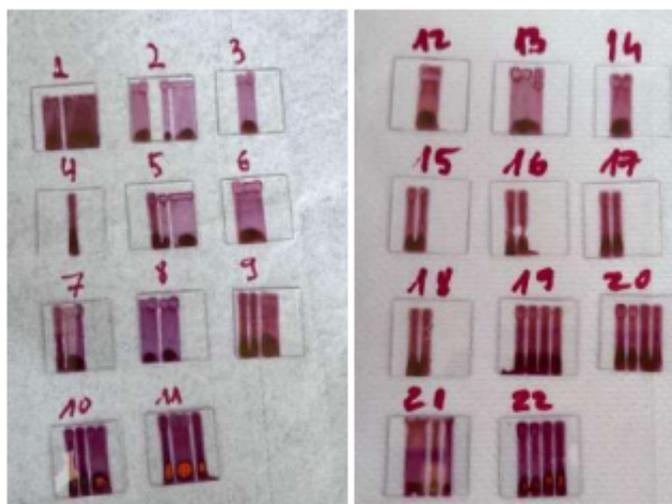


Figura 1 : Filmes fabricados a partir de uma solução de P3HT em DCB depositada por *blade coating* sobre substrato de vidro.

Os filmes obtidos passaram por tratamento térmico a 150 °C por 20 minutos, promovendo reorganização molecular e melhora da cristalinidade. A caracterização dos filmes foi conduzida com diferentes técnicas:

- **UV-Vis:** para análise de absorção óptica e bandas eletrônicas;
- **Raman e FTIR:** para confirmar a integridade química e estrutural dos polímeros após deposição;
- **Difração de Raios-X (DRX):** para avaliar o grau de cristalinidade e organização molecular;
- **Microscopia de Força Atômica (MFA):** para analisar topografia, rugosidade e homogeneidade dos filmes.

As atividades experimentais foram realizadas com o apoio da empresa Autocoat – Equipamentos e Processos de Deposição LTDA, no Parque Científico e Tecnológico da Unicamp. A parceria possibilitou acesso a infraestrutura de ponta e treinamento técnico envolvendo normas de segurança, descarte de reagentes, manuseio de

equipamentos e conduta em ambiente laboratorial. O protocolo construído se mostrou robusto e reprodutível, estabelecendo uma base sólida para a fabricação de dispositivos OTFTs voltados à detecção seletiva de gases em futuras aplicações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Ao longo do projeto, foram produzidos e caracterizados diversos filmes finos orgânicos utilizando a técnica de *blade coating*, com destaque para a formação controlada de dispositivos funcionais e a validação da metodologia adotada.

A produção inicial ocorreu em 12 de setembro de 2024, utilizando uma solução de P3HT em diclorobenzeno (DCB), aplicada sobre substrato de vidro. Esta etapa teve como objetivo a familiarização com o equipamento e o estudo dos efeitos dos parâmetros de deposição sobre a qualidade dos filmes. Posteriormente, em 24 de setembro, experimentos focados na deposição de faixas paralelas (*striped films*) permitiram determinar o volume máximo por dente da lâmina metálica sem fusão entre as faixas, etapa fundamental para viabilizar a integração de múltiplos semicondutores em um único substrato.

Com a metodologia consolidada, foram fabricados os primeiros dispositivos OTFTs sobre silício (com eletrodos de Ni:Cr/Au) e sensores interdigitados sobre vidro. Em uma etapa avançada, foram produzidos dispositivos contendo múltiplas faixas alternadas de P3HT e PBTTT-C14, comprovando a eficácia do *blade coating* para aplicações complexas. A seguir é apresentado alguns dos dispositivos implementados.

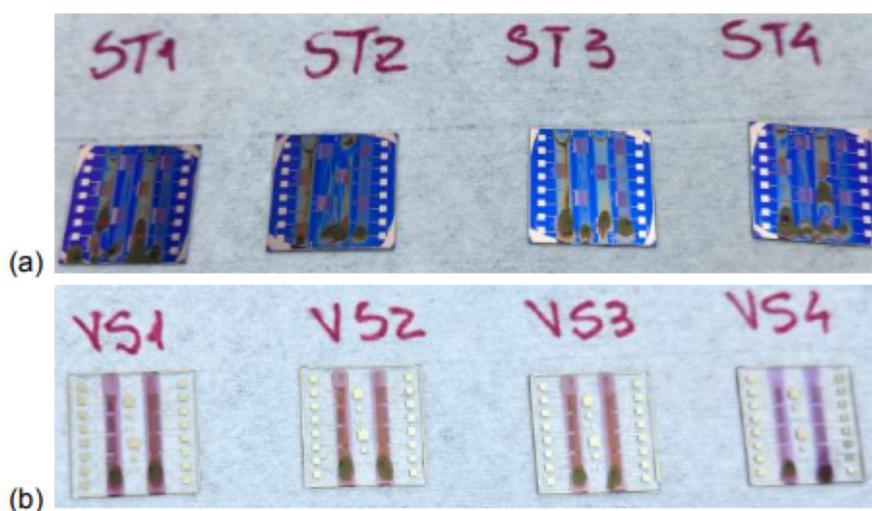


Figura 6: Fotos dos OTFTs fabricados com eletrodos de Ni:Cr/Au sobre substrato de silício (a) e vidro (b).

A caracterização óptica por espectroscopia UV-Vis evidenciou picos de absorção em torno de 549 nm para os filmes de PBTTT-C14, típicos das transições π - π^* , com variações de intensidade entre as faixas indicando influência da morfologia local, reflexo direto dos parâmetros de deposição.

A espectroscopia Raman confirmou a integridade estrutural dos polímeros:

- **PBTTT-C14:** picos em 1389–1390, 1413–1415 e 1489–1490 cm^{-1} , associados aos modos de estiramento C=C e C–C.
- **P3HT:** picos em 1376–1380 e 1447–1450 cm^{-1} , também relacionados às ligações da cadeia principal.

Esses resultados demonstram que a técnica de *blade coating* preserva a estrutura química dos materiais mesmo sob diferentes velocidades de deposição. As análises FTIR dos filmes de PBTTT-C14 identificaram bandas em 2853 e 2923 cm^{-1} , características das vibrações CH_2 e CH_3 , reforçando a formação de uma estrutura bem organizada, compatível com literatura especializada. Por fim, a caracterização elétrica por espectroscopia de impedância revelou comportamento típico de circuito RC paralelo. O gráfico de Nyquist dos sensores de PBTTT-C14 indicou resistência de 560 k Ω e capacitância de 24,3 pF, valores consistentes com aplicações em sensores de gases. Tais dados atestam a funcionalidade elétrica dos filmes e a viabilidade da técnica para fabricação de dispositivos OTFTs sensoriais.

CONCLUSÕES:

O estudo comprovou que a técnica de *blade coating* é uma alternativa viável, eficiente e sustentável para a fabricação de filmes finos orgânicos. Em comparação ao *spin coating*, proporcionou maior controle de espessura e redução significativa no consumo de material. As caracterizações ópticas (UV-Vis), estruturais (Raman e FTIR) e elétricas confirmaram a preservação das propriedades dos polímeros P3HT e PBTTT-C14 e sua adequação para aplicações eletrônicas. A resposta elétrica obtida por espectroscopia de impedância revelou desempenho compatível com sensores de gases baseados em OTFTs. O protocolo desenvolvido mostrou-se robusto e reprodutível, estabelecendo fundamentos sólidos para futuras aplicações em dispositivos multifuncionais e flexíveis, como narizes eletrônicos.

BIBLIOGRAFIA

Ajayan, J.; Sreejith, S.; Manikandan, M.; Sreenivasulu, V.B.; Kumari, N.A.; Ravindran, A.. An intensive study on organic thin film transistors (OTFTs) for future flexible/wearable electronics applications. *Micro and Nanostructures*, 187, p. 207766, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.micrna.2024.207766>

Liang Q, Duan M, Liu X, et al. Recent advances in effect of crystallization dynamics process on the morphology of active layer in organic solar cells. *Battery Energy*, -, p. -, 2024. <https://doi.org/10.1002/bte2.20230073>

Dickson, L.E.; Cranston, R.R.; Xu, H.; Swaraj, S.; Seferos, D.S.; Lessard, B.H. Blade Coating Poly(3-hexylthiophene): The Importance of Molecular Weight on Thin-Film Microstructures. *ACS Applied Materials & Interfaces* 47, p. 55109-55118, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c12335>

Wan-Zhen Fo, Jun Li, Yu-Xing Lei, Bin Wei, Zhi-Lin Zhang, A facile and efficient preparation method for the doped light emitting layer in OLEDs: Blade-coated planar source evaporation, Organic Electronics, Volume 124, 2024, 106961, ISSN 1566-1199, <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2023.106961>

Eirez Izquierdo, J.E. Projeto, caracterização e avaliação de transistores de filmes finos orgânicos para uso em narizes eletrônicos. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos (PSI) - Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP): Brasil. p. 179, 2021. <https://doi.org/10.11606/T.3.2021.tde-08102021-110039>

Hamanaka, V.N. Desenvolvimento de diodos orgânicos emissores de luz por blade coating. Tese (Doutorado em Microeletrônica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP): Brasil. p. 115, 2020. <https://doi.org/10.11606/T.3.2020.tde-21012021-103709>