



Filmes Finos aplicados na fabricação de sensores táteis piezoresistivos

Jesus LS*, Viana JL, Moro JR* e Bock EGP*

**Instituto Federal de São Paulo - IFSP, São Paulo, BRA.*

Resumo. O presente estudo descreve os processos de obtenção de Filmes Finos utilizados na fabricação dos sensores táteis piezoresistivos. Os sensores flexíveis tem crescente aplicação na indústria e em pesquisas científicas. Através de um estudo bibliográfico e visitas técnicas em instituições especializadas em tecnologias de filmes finos, descreve-se os processos de obtenção, materiais e as principais técnicas utilizadas no processo produtivo. Os processos de CVD - *Chemical Vapor Deposition* e PVD - *Physical Vapor Deposition* são aplicados na obtenção dos filmes finos dos principais sensores táteis disponíveis no mercado. As instalações de vácuo são de grande importância neste tipo de fabricação, e são montadas conforme as necessidades específicas para a obtenção das camadas construtivas.

Palavras-chave. CVD, PVD, Vácuo.

1. Introdução

Sensor é um dispositivo que mede uma quantidade física e converte-o em um sinal que pode ser lido por um observador ou por um instrumento. Os pesquisadores têm descrito com frequência dispositivos ou técnicas que preparam o caminho para sensores conformáveis para aplicações em cuidados de saúde, peles eletrônicas vestíveis [18] e adaptáveis para robôs [1].

Em geral, os sensores táteis pertencem à classe especial de transdutores de força ou pressão que são caracterizados por pequenas espessuras, ou à classe de sensores de proximidade que respondem a uma presença muito próxima (<1mm) ou contato por um 'dígito' - humano ou mecânico [7].

Os métodos piezoresistivos tem sido utilizados na robótica em projetos especialmente desenvolvidos para agarre de objetos. Identificou-se que as vantagens dessa aplicação se devem ao uso de polímeros, que são mais flexíveis, lineares e elásticos [1].

O sensor flexível, uma das partes mais essenciais da flexibilidade eletrônica tem suas aplicações potenciais no monitoramento humano e movimento do robô [18].

Os polímeros sintéticos estão entre os substratos mais usados devido à sua versatilidade e processabilidade, que permitem a formação de uma estrutura flexível, a um baixo custo e alta eficiência.



Através da Deposição Química de Vapor (*Chemical Vapor Deposition* - CDV) ou Deposição Física de Vapor (*Physical Vapor Deposition* - PVD), podem ser formados filmes finos ou matrizes de detecção, utilizados para decorar superfícies ou integrar-se em substratos para obter um melhor desempenho.

Os Filmes Finos (FF) têm função essencial nos dispositivos eletrônicos, sendo utilizados para isolar camadas condutoras; como elementos estruturais; para proteger as superfícies do meio externo; ou ainda como fonte dopante e barreira para a dopagem [19].

2. Objetivo

Este estudo teve por objetivo descrever os processos de obtenção de filmes finos utilizados na construção de sensores táteis piezoresistivos.

3. Materiais e Métodos

Procedemos com um estudo bibliográfico acerca dos temas: Sensores Táteis, Filmes Finos (FF), PVD (*Physical Vapor Deposition*) e CVD (*Chemical Vapor Deposition*).

Para o aprofundamento sobre os processos de construção, foram realizadas três visitas técnicas em instituições especializadas na fabricação de produtos de Filmes Finos. As visitas ocorreram nos seguintes locais:

- a) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) - São José dos Campos - São Paulo - Brasil;
- b) CVDVale - São José dos Campos - São Paulo - Brasil;
- c) Oerlikon Balzers - Jundiaí - São Paulo - Brasil.

4. Estudo Bibliográfico

4.1 Sensores Flexíveis

Os sensores flexíveis devem ser capazes de sofrer deformações, e ao mesmo tempo, as propriedades funcionais e os parâmetros de desempenho eletrônico não devem ser afetados pelo processo de deformação [7].

O sensor de pressão pode diferir em tecnologia, design, desempenho, adequação da aplicação e custo. Ele pode ser classificado com base em vários princípios de transdução, como resistivo/piezoresistivo, efeito de túnel, capacitivo, óptico, ultrassônico, magnético e piezoelétrico [1].

Os materiais como os piezoresistivos e polímeros, são utilizados para melhorar a sensibilidade de detecção de mecanismos de pega. O baixo custo, fácil disponibilidade, alta flexibilidade mecânica e a facilidade de processamento, são algumas das razões para a escolha dos polímeros na

construção. Algumas das maiores vantagens de usar os polímeros e materiais condutivos juntos para desenvolver os adesivos do sensor estão nas suas vantagens combinadas [13].

4.1.1. Sensores Flexiforce

Disponível no mercado como dispositivo de fácil aplicação, o sensor FlexiForce [20] é flexível e ultrafino o suficiente, pois os pesquisadores e designers podem usá-lo em diferentes aplicações integradas, bem como para aplicações orientadas para tarefas manipulativas com garras de mão robótica [1].

Este é um sensor de filme fino com propriedades piezoresistivas. Estes utilizam a mudança da resistência elétrica de um material quando este for mecanicamente deformado. Possuem propriedades adequadas de detecção de força, linearidade, baixa histerese, desvio e sensibilidade à temperatura.

A sua construção consiste de duas camadas de substrato, como mostrado na Figura 1 [1]. Este substrato é formado por um filme de poliéster e um material condutor de prata que se aplica a cada camada. Uma camada de tinta resistiva sensível à pressão é utilizada, seguida de um adesivo para combinar as duas camadas de substrato para compor o sensor.

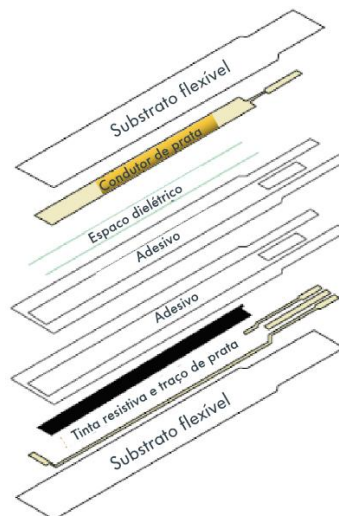


Figura 1. Componentes do sensor FlexiForce.

Os metais dúcteis, especialmente ouro e prata, são considerados como candidatos primários para fabricar eletrodos flexíveis. Estes metais apresentam ótima condutividade, e forte durabilidade ao alongamento e a flexão [23].

Os filmes metálicos podem ser aplicados e padronizados em um processo convencional envolvendo deposição de vapor seguido por fotolitografia, ou imprimindo uma tinta carregada de nanopartículas e sinterizando para formar um filme eletricamente contínuo.

Diversas aplicações utilizando o sensor FlexiForce são implementadas por pesquisadores. Como exemplo, na medição da pressão ou força da interface entre dois objetos em sistemas robóticos. Os materiais destes sensores foram considerados adequados o suficiente para serem utilizados na mão robótica para agarrar objetos [1].

4.2. Filmes Finos

Os Filmes Finos têm função essencial nos dispositivos eletrônicos, sendo utilizados para isolar camadas condutoras ou como elementos estruturais; ou para proteger as superfícies do meio externo; ou ainda como fonte dopante e barreira para a dopagem. Eles podem ser condutores, semicondutores ou isolantes, em geral crescidos termicamente ou depositados a partir da fase de vapor [19].

De maneira geral, os FF são utilizados para melhorar as superfícies dos sólidos. Transmissão, reflexão, absorção, dureza, resistência a abrasão, corrosão, permeabilidade e comportamento elétrico são algumas das propriedades que podem ser melhoradas [8].

As propriedades dos materiais com FF depositados dependem dos processos de deposição, que são divididos em dois grupos fundamentais [19]:

Primeiro grupo - Crescimento dos FF pela reação da superfície do substrato com as substâncias presentes no ambiente do processo (atmosfera);

Segundo grupo - Crescimento dos FF pela deposição sem reação com o substrato.

Os autores Frey e Khan [8], dividem os processos de Filmes Finos em: PVD - *Physical Vapor Deposition* (Deposição Física de Vapor) e CVD - *Chemical Vapor Deposition* (Deposição Química em Fase Vapor). Estes, serão descritos a seguir.

Há ainda a classificação dos processos de FF em: Métodos Evaporativos, Processos Incandescentes de Brilho, Processos de Fase Gasosa e Fase Líquida [17]. Os processos também podem ser classificados em deposição física, íon e química [21].

4.2.1. PVD

A Deposição Física de Vapor (PVD), corresponde a um grupo de processos de revestimento em que o material é convertido em forma de vapor em uma câmara de vácuo e posteriormente condensado na superfície de um substrato como um FF [9, 3]. Os vapores, que constituem o material do revestimento, são obtidos a partir de gases reativos ou de sólidos sublimados no interior do forno por descarga elétrica [3].

A PVD pode ser aplicada para obtenção de uma larga variedade de revestimentos de materiais: metálicos, ligas, cerâmicas e outros compostos inorgânicos, e em certos polímeros. Os possíveis substratos para deposição são: metais, vidros e plásticos. A técnica representa uma versátil tecnologia de revestimento, aplicável para uma quase ilimitada combinação de substâncias de revestimento e materiais de substratos [9]. Quase todos os metais ou compostos, que não se decompõem quimicamente, podem ser pulverizados, tornando este processo um método bastante flexível [3]. A Figura 2 ilustra os passos deste processo.



Figura 2. Passos do processo PVD.

O método resume-se em depositar materiais na forma de multicamadas, na ordem de nanômetros até alguns micrômetros. Está mais relacionado a deposições a vácuo, em que são seguidos alguns passos para a deposição. O primeiro passo consiste em vaporizar o material a partir de sua forma sólida, em um ambiente a vácuo e alta temperatura, ou ainda depositá-lo via plasma. Desta maneira, é necessário direcionar este material vaporizado, até o substrato, fazendo que o mesmo se condense e cristalize para a produção dos filmes finos [15].

Os processos de PVD são classificados em três grupos: Evaporação a Vácuo, *Sputtering* e *Ion Plating* [9]. As características destes processos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Os três principais grupos de PVD.

Grupo	Características	Materiais de revestimento típico
Evaporação à Vácuo	Equipamento é relativamente de baixo-custo e simples; Deposição de compostos é difícil; Adesão do filme não é tão boa quanto os outros Processos de PVD	Ag, Al, Au, Cr, Cu, Mo e W.
<i>Sputtering</i> : baseia-se no bombardeamento catódico	Melhor poder de arremesso e adesão do filme que a Evaporação à Vácuo; Pode-se revestir compostos; Taxas de Deposição mais lentas e maior dificuldade no controle do processo que a Evaporação à Vácuo.	Al ₂ O ₃ , Au, Cr, Mo, SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , TiC e TiN.
<i>Ion Plating</i> : técnica de revestimento por deposição de íons	Melhor cobertura e adesão do filme dos Processos PVD; Controle de processo mais complexo; maiores taxas de deposição que o <i>Sputtering</i> .	Ag, Au, Cr, Mo, Si ₃ N ₄ , TiC e TiN.

As técnicas mais utilizadas em PVD, são Evaporação térmica e *Sputtering* [22]. As aplicações consistem na fabricação de dispositivos microeletrônicos, conectores, baterias e eletrodos para células de combustíveis, supercapacitores, funcionalização de superfícies e revestimentos óticos e condutivos [11].

4.2.2. CVD

A Deposição Química em Fase Vapor (CVD) consiste na obtenção de materiais sólidos na forma de FF, com estrutura monocristalina, policristalina, amorfo ou epitaxial. É empregado para a deposição de solução contendo material base e solvente, e também materiais na fase gasosa. Para as deposições, são variados e diversos os parâmetros aplicados: o material do substrato, a temperatura de deposição, concentração da solução; ou ainda, composição da mistura do gás, pressão, etc. A técnica consiste em depositar material em uma área muito específica ou em grandes áreas, mantendo bons resultados na repetibilidade na produção [2].

São necessárias cinco etapas para formação do FF utilizando-se o CVD [19]:

- a) Reagentes específicos e gases diluentes inertes são introduzidos em determinada quantidade (com fluxo controlado) em uma câmara de reação (o reator);
- b) Os gases difundem até a superfície do substrato;
- c) Os reagentes são adsorvidos na superfície;
- d) Os átomos adsorvidos reagem formando o FF;
- e) Os subprodutos da reação são dissolvidos e removidos da câmara através de exaustão.

As reações químicas no CVD ocorrem através de aquecimento de: Gás, Gás + Gás, Gás + Sólido ou Gases + Sólido, que resultam em um Sólido + Gases, que são assistidas por aumento de temperatura e um processo de pirólise (reações ilustradas na Figura 3).

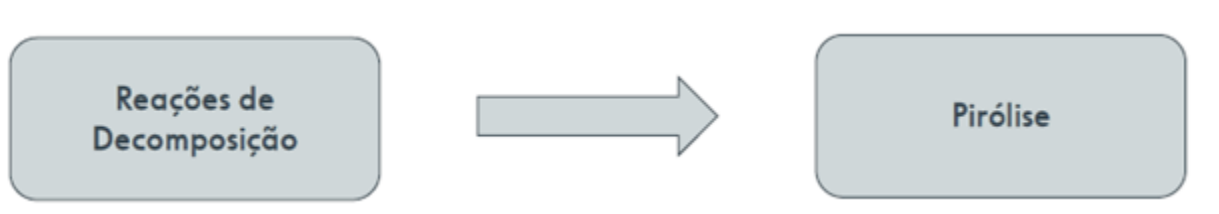


Figura 3. Reações em CVD.

As reações químicas no CVD ocorrem através de aquecimento de: Gás, Gás + Gás, Gás + Sólido ou Gases + Sólido, que resultam em um Sólido + Gases, que são assistidas por aumento de temperatura e um processo de pirólise (reações ilustradas na Figura 3).

As reações de decomposição podem ser de diversos tipos:

Hidrocarbonetos: $\text{HC}_4(\text{g}) \rightarrow \text{C}(\text{s}) + 2 \text{H}_2(\text{g})$ (produção de Carbono, Grafite e Diamante através de Metano);

Halogeneta: $\text{WF}_6(\text{g}) \rightarrow \text{W}(\text{s}) + 3 \text{F}_2(\text{g})$ / $\text{TiI}_4(\text{g}) \rightarrow \text{Ti}(\text{s}) + 2 \text{I}_2(\text{g})$ (obtenção de FF de Tungstênio e Titânio);

Carbonila: $\text{Ni}(\text{CO})_4(\text{g}) \rightarrow \text{Ni}(\text{s}) + 4 \text{CO}(\text{g})$ (superfícies de Níquel);

Hidreto: $\text{SiH}_4(\text{g}) \rightarrow \text{Si}(\text{s}) + 2 \text{H}_2(\text{g})$ / $\text{B}_2\text{H}_6(\text{g}) \rightarrow 2 \text{B}(\text{s}) + 3 \text{H}_2(\text{g})$ (Quebra de gases compostos de H4 e H6, formando FF mais H2 como elemento);

Hidrogênio: $\text{WF}_6(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{W}(\text{s}) + 6 \text{HF}(\text{g})$ / $\text{SiCl}_4(\text{g}) + 2 \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{Si}(\text{s}) + 4 \text{HCl}(\text{g})$ (uso do H2 para quebra do elemento gasoso inicial);

Coredução: $\text{TiCl}_4(\text{g}) + 3 \text{BCl}_3(\text{g}) + 5 \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{TiB}_2(\text{s}) + 10 \text{HCl}(\text{g})$ (reações iniciais com Óxidos, Nitreto e Silicatos);

Redução Metálica de Haleto: $\text{TiI}_4(\text{g}) + \text{Zn}(\text{s}) \rightarrow \text{Ti}(\text{s}) + 2 \text{ZnI}_2(\text{g})$ / $\text{TiCl}_4(\text{g}) + 2 \text{Mg}(\text{s}) \rightarrow \text{Ti}(\text{s}) + 2 \text{MgCl}_2(\text{g})$ (uso de metais para quebra do gás da reação inicial);

Oxidação e Reações de Hidrólise: $\text{SiH}_4(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{SiO}_2(\text{s}) + 2 \text{H}_2(\text{g})$ / $\text{SiCl}_4(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{SiO}_2(\text{s}) + 4 \text{HCl}(\text{g}) + 2 \text{CO}(\text{g})$ / $2 \text{AlCl}_3(\text{g}) + 3 \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3(\text{s}) + 6 \text{HCl}(\text{g})$;

Carbidização e Nitretação: $\text{TiCl}_4(\text{g}) + \text{CH}_4(\text{g}) \rightarrow \text{TiC}(\text{s}) + 4 \text{HCl}(\text{g})$ (obtenção de Carbetos e Nitretos, exemplo: Carbeto de Titânio).

Pierson [16], classifica os processos de CVD de acordo com suas reações e produtos resultantes, podendo ser:

- a) Metalorgânico;
- b) Alotropia do carbono;
- c) Elementos não metálicos;
- d) Materiais cerâmicos: Carbetos, Nitretos, Óxidos, Boratos e Silicatos;
- e) Aplicações eletrônicas: Semicondutores, Condutores, Isolantes e Barreiras de Difusão;
- f) Aplicações óticas;
- g) Aplicações de revestimento e resistência à corrosão;
- h) Ferramentas de usinagem;
- i) Fibras, pós e aplicações monolíticas.

Algumas das aplicações do método CVD consiste em produzir equipamentos para indústria microeletrônica: na construção de dielétricos, condutores, óxidos condutivos e etc. Também são aplicadas para semicondutores: na produção de detectores de radiação, dispositivos de micro-ondas e células solares [15].

4.3. Comparação entre os processos de PVD e CVD

No processo da CVD os gases são chamados de precursores em estado de vapor, e são depositados no FF ocorrendo reações químicas na superfície do substrato. Já na PVD o material é vaporizado por Calor ou *Sputtering* e recondensa na superfície do substrato formando o FF. A Figura 4 [5] ilustra a comparação entre os dois processos.

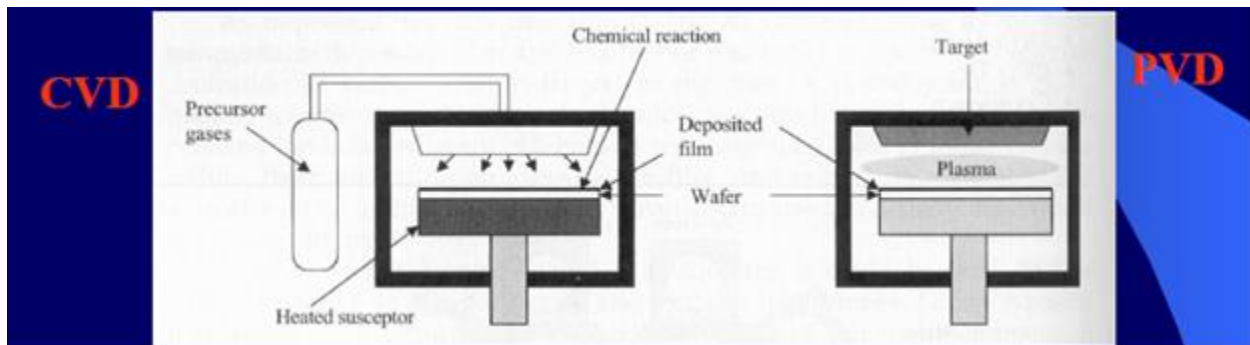


Figura 4. Comparativo dos processos CVD e PVD.

Os processos de deposição apresentados permitem a criação de revestimentos finos próximos de 0.1 μm . Para melhor compreender as diferenças entre as distintas técnicas, a Tabela 2 [6] apresenta algumas especificidades.

Tabela 2. Diferenças na deposição por PVD ou CVD.

PVD	CVD
Necessita de câmara de vácuo	
Vaporiza o material a depositar que se encontra em estado sólido, formando o plasma e recondensa o vapor na superfície do substrato;	Usa gases em estado de vapor e o filme é criado através de reações químicas;
Opera com temperaturas entre 200°C-500°C;	Opera com temperaturas entre os 600°C-1000°C;
A ação de deposição dá-se pela diferença de potencial gerada, os ions são atraídos para a superfície dos substratos a serem revestidos;	A elevada temperatura do processo restringe o leque de materiais que podem ser revestidos;
Os substratos devem estar posicionados na linha de visão do cátodo para promover uma deposição homogénea. Este facto impede o revestimento de peças com geometrias complexas.	Pode ser aplicada em produtos com geometrias complexas, dado não existir a limitação da linha de visão;

Os métodos apresentam variadas valências, assim como, uma enorme flexibilidade associada a diferentes substratos e distintos revestimentos a aplicar. Pode ser positivo criar revestimentos que tenham camadas aplicadas por CVD e outras por PVD, de forma a ultrapassar algumas preocupações, como a dificuldade de um determinado material não poder ser aplicado por CVD, devido às temperaturas elevadas do processo [6].

5. Visitas Técnicas

As visitas técnicas realizadas pelos autores foram fundamentais para o aprimoramento do conhecimento acerca dos processos que envolvem a utilização das técnicas de PVD e CVD.

No Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que possui o Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais [10], e área de concentração em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, visitamos dois laboratórios:

Laboratório de deposição de Filmes Finos, Matalografia e Caramografia - Utilizado para evaporação de filmes finos metálicos para contatos elétricos e filmes isolantes para camadas ópticas.

Laboratório para crescimento de diamante CVD – este laboratório possui 5 reatores disponíveis, um deles é dedicado a estudos de dopagem do diamante com boro para obtenção de eletrodos para eletroquímica.

Na empresa CVDVale [4], observamos processos que utilizam a CVD para produção de FF, e que são aplicados em produtos de diversas áreas: odontológica, revestimentos de carbono tipo diamante, brocas de perfuração. Nesta, há ainda o projeto e confecção de reatores, sistemas de alto vácuo e fontes de alta tensão para os setores industrial e acadêmico. Dentre as aplicações alinhadas ao nosso estudo está o uso dos FF para materiais elétricos propensos a corrosão.

A empresa Oerlikon Balzers [14], utiliza em seus processos produtivos as técnicas de CVD e PVD. As aplicações que observamos ocorrem em diversos componentes e ramos de atividade. Dentre as aplicações destacamos os produtos para as indústrias Automotiva e Aeroespacial, e para a produção de Semicondutores.

6. Considerações Finais

Esse trabalho apresentou as técnicas utilizadas para a fabricação de sensores táteis piezoresistivos, a construção pode ser por meio da PVD ou CVD; ou utilizando ambas as técnicas a depender das características construtivas e do tipo de aplicação.

As visitas técnicas realizadas foram essenciais para o direcionamento da confecção do presente artigo e permitiram a preparação dos autores para trabalhos futuros.

Como apresentado, as técnicas de FF são aplicadas a diversos produtos, seja para atender uma premissa de construção, como é o caso dos sensores táteis ou para melhorar as características do produto por meio do revestimento.

Referências.

- [1] Almassri, A.M., Hasan, W.Z.W., Ahmad, S.A., Ishak, A.J., Ghazali, A.M., Talib, D.N., Wada, C., 2015. Pressure sensor: State of the art, design, and application for robotic hand. *Journal of Sensors* URL: <GotoISI>://WOS:000359247400001, doi:10.1155/2015/846487.
- [2] Carlsson, J.O., Martin, P.M., 2010. Chemical vapor deposition, in: *Handbook of Deposition Technologies for films and coatings*. Elsevier, pp. 314–363.
- [3] Costa, A.F., 2016. Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD e CVD no torneamento do aço ABNT 8620. Mestrado em engenharia mecânica. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá.
- [4] CVDVALE, 2023. Cvdvale. URL: <https://www.cvdvale.com.br/index>.
- [5] Doi, I. Capítulo 12 deposição de filmes finos por pvd -pt i. URL: <https://www.ccs.unicamp.br/novosite/ie521/files/2013/08/CVD-II.pdf>.
- [6] Ferreira, A.d.A., 2020. Desenvolvimento e caracterização de filmes finos de cromo produzidos por Sputtering em peças poliméricas. Mestrado em engenharia mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto.
- [7] Fraden, J., 2015. *Handbook of Modern Sensors: physics, designs, and applications*. Fifth Edition, Springer, San Diego.
- [8] Frey, H., Khan, H.R., 2015. *Handbook of thin film technology*. Springer.
- [9] Groover, M.P., 2020. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons.
- [10] INPE, 2023. Programa de pós-graduação em engenharia e tecnologia espaciais. URL: <http://www.inpe.br/posgraduacao/ete/sobre-curso.php>.
- [11] Mattox, D.M., 2010. *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. William Andrew.
- [12] Moutinho, J.D.F., 2011. Produção de filmes finos multicamada Al/Ni por eletrodeposição. Mestrado em engenharia metalúrgica e de materiais. Universidade do Porto. Porto.
- [13] Nag, A., Menzies, B., Mukhopadhyay, S.C., 2018. Performance analysis of flexible printed sensors for robotic arm applications. *Sensors and Actuators a-Physical* 276, 226–236. URL: <GotoISI>://WOS:000433646100026, doi:10.1016/j.sna.2018.04.031.
- [14] Oerlikon, 2023. Oerlikon balzers. URL: <https://www.oerlikon.com/balzers/br/br/>.



- [15] Oliveira, T.A., 2019. Crescimento de Materiais Semicondutores Cristalinos de Iodeto de Mercúrio para Aplicações como Detectores de Radiação. Mestrado acadêmico interdisciplinar em biociências. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. Uberaba.
- [16] Pierson, H.O., 1999. Handbook of chemical vapor deposition: principles, technology and applications. William Andrew.
- [17] Seshan, K., 2002. Handbook of thin film deposition techniques principles, methods, equipment and applications, second editon. CRC Press.
- [18] Sun, Q.Q., Qian, B.B., Uto, K., Chen, J.Z., Liu, X.Y., Minari, T., 2018. Functional biomaterials towards flexible electronics and sensors. *Biosensors & Bioelectronics* 119, 237–251. URL: <GotoISI>://WOS:000444659900032, doi:10.1016/j.bios.2018.08.018.
- [19] Tatsch, P.J., 2000. Deposição de filmes finos. V Oficina de Microeletrônica, 22.
- [20] Tekscan, 2018. ELF & WELF2 User Manual. v. 4.3x (rev p) ed. South Boston.
- [21] Wasa, K., Kitabatake, M., Adachi, H., 2004. Thin film materials technology: sputtering of control compound materials. Springer Science & Business Media.
- [22] Westwood, W., 2003. Sputter Deposition, AVS Education Committee Book Series. Education Committee, AVS.
- [23] Xu, M., Obodo, D., Yadavalli, V.K., 2019. The design, fabrication, and applications of flexible biosensing devices. *Biosensors & Bioelectronics* 124, 96–114. URL: <GotoISI>://WOS:000451935500013, doi:10.1016/j.bios.2018.10.019.