

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

IVAN RONALD SERATHIUK DA SILVEIRA

**ELETRODOS FLEXÍVEIS COM COMPÓSITOS DE POLIANILINA, NANOTUBOS
DE CARBONO E LIGNINA PARA SENSORES DE PRESSÃO**

CURITIBA

2026

IVAN RONALD SERATHIUK DA SILVEIRA

**ELETRODOS FLEXÍVEIS COM COMPÓSITOS DE POLIANILINA, NANOTUBOS
DE CARBONO E LIGNINA PARA SENSORES DE PRESSÃO**

**Flexible electrodes with polyaniline, carbon nanotube and lignin composites
for pressure sensors**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Física – Linha de pesquisa: Física da Matéria Condensada.

Orientador: Prof. Dr. Wilson José da Silva

Coorientadora: Prof. Dr. Andréia

Geniski Macedo

CURITIBA

2026



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



IVAN RONALD SERATHIUK DA SILVEIRA

**ELETRODOS FLEXÍVEIS COM COMPÓSITOS DE POLIANILINA, NANOTUBOS DE CARBONO E LIGNINA
PARA SENSORES DE PRESSÃO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Física.

Data de aprovação: 29 de Maio de 2026

Dr. Wilson Jose Da Silva, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Michelle Sostag Meruvia, Doutorado - Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Pucpr)

Dr. Sergio Francisco Pichorim, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 04/08/2026.

Dedico este trabalho à minha família, por todo o
apoio que me deram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família pelo apoio incondicional e pela compreensão ao longo desta jornada, especialmente nos momentos em que minhas ausências se fizeram necessárias diante das exigências do curso.

Ao Prof. Dr. Wilson José da Silva, pela orientação dedicada, pelas sugestões valiosas e pelas discussões que contribuíram de forma fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

À Prof. Dra. Andreia Macedo, pelas conversas enriquecedoras, sugestões e discussões que tanto acrescentaram a esta pesquisa.

Ao colega Juscelino, pelo apoio e pela parceria no laboratório, cuja ajuda foi essencial em diversos momentos.

Aos pesquisadores da Bosch do Brasil, pela disponibilidade e pela abertura de seus laboratórios para a realização dos testes com os sensores.

À Prof. Dra. Paula Rodrigues e a Lialis (DAQBi), pela importante contribuição a este trabalho e pela gentileza na disponibilização da polianilina e da lignina.

Ao almoxarifado do DAFIS, nas pessoas de Rodrigo Ricetti e Cristian, pela prestatividade sempre presente.

Aos Laboratórios Multiusuários LAMAQ e CMCM da UTFPR-CT, pela infraestrutura disponibilizada.

À Fundação Araucária e ao NAPI-Eletrônica Orgânica, pelo apoio financeiro que viabilizou a realização deste projeto.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

SERATHIUK, I. **Eletrodos flexíveis com compósitos de polianilina, nanotubos de carbono e lignina para sensores de pressão**. 2026. 96 páginas. Dissertação (Mestrado em Física da Matéria Condensada) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2026.05.

Este trabalho reporta o desenvolvimento, caracterização e otimização de sensores de pressão produzidos com nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT) e blendas de polianilina (PANI):lignina(rede). Os dispositivos são fabricados sobre substratos flexíveis de PET, utilizando spin coating para deposição dos SWCNT e blade coating para os filmes de PANI:lignina. Os resultados demonstram que a incorporação de lignina modifica significativamente as propriedades eletromecânicas dos eletrodos, permitindo ajustar a sensibilidade e ampliar a faixa de operação dos sensores. A PANI pura apresenta elevada sensibilidade inicial ($0.47\text{-}0.60\text{ MPa}^{-1}$), porém com saturação em torno de 2.1 MPa . Em contrapartida, as formulações contendo 3% e 10% de lignina exibem menor sensibilidade ($\approx 0,035$ e $\approx 0,049\text{ MPa}^{-1}$, respectivamente), no entanto com faixa de resposta ampliada até cerca de 6 MPa . Os dispositivos apresentam tempos de resposta inferiores a 1 s e repetibilidade nos ensaios cíclicos. Portanto, a combinação de SWCNT, PANI e lignina resultou em sensores flexíveis de baixo custo, ampla faixa de operação e desempenho competitivo em relação a tecnologias descritas na literatura, evidenciando seu potencial para aplicações em monitoramento de pressão e eletrônica flexível.

Palavras-chave: sensores de pressão; polianilina; lignina; SWCNT; eletrodos flexíveis; AFM.

ABSTRACT

SERATHIUK, I. **Flexible electrodes with polyaniline, carbon nanotube and lignin composites for pressure sensors**. 2026. 92 pages. Master's Thesis (master's degree in Condensed Matter Physics) – Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2026.05.

This work reports the development, characterization, and optimization of pressure sensors based on single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) and polyaniline (PANI)/lignin blends. The devices were fabricated on flexible polyethylene terephthalate (PET) substrates using spin coating for SWCNT deposition and blade coating for the PANI/lignin films. The results demonstrate that the incorporation of lignin significantly modifies the electromechanical properties of the electrodes, enabling the tuning of sensor sensitivity while extending the operating pressure range. Pure PANI exhibits high initial sensitivity ($\approx 0.47\text{--}0.60\text{ MPa}^{-1}$), but its response saturates at approximately 2.1 MPa. In contrast, formulations containing 3 wt% and 10 wt% lignin show lower sensitivities (≈ 0.035 and $\approx 0.049\text{ MPa}^{-1}$, respectively), while providing an extended sensing range of up to approximately 5-6 MPa. The devices exhibit response times below 1 s and excellent repeatability during cyclic tests. Therefore, the combination of SWCNTs, PANI, and lignin resulted in low-cost, flexible pressure sensors with a wide operating range and competitive performance compared with technologies reported in the literature, highlighting their potential for pressure monitoring and flexible electronics applications.

Keywords: pressure sensors; polyaniline; lignin; SWCNT; flexible electrodes; AFM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de sensor de pressão piezorresistivo utilizado em equipamentos e tubulações industriais	14
Figura 2 – Exemplo de aplicação de sensores de pressão nos monitores de pressão arterial	14
Figura 3 – Exemplo de sensor de monitoramento de pressão intracraniano	15
Figura 4 – Exemplo de sensor de pressão acoplado à uma célula de carga monitorando uma ponte.....	15
Figura 5 – Exemplo de sensores de pressão acoplados a tubulações e equipamentos industriais (em amarelo).	15
Figura 6 – Estrutura química da Polianilina	18
Figura 7 – Identificação por cor das fases da PANI obtidas com os processos de purificação: (a) sal de esmeraldina de polianilina (PANI-ES), (b) base de esmeraldina de polianilina (PANI-EB) e (c) base de pernigranilina de polianilina (PANI-PB).	20
Figura 8 – Polianilina:lignina (rede)	21
Figura 9 – Nanotubos de carbono de parede simples.....	22
Figura 10 – Nanotubos de carbono: a) nanotubos <i>armchair</i> , ângulo quiral ($\theta = 30^\circ$), b) zigue-zague, ângulo quiral ($\theta = 0^\circ$) e c) quiral, com ângulo quiral entre $0^\circ < \theta < 30^\circ$	23
Figura 11 – A estrutura detalhada da lignina com vários tipos de ligações e representantes..	24
Figura 12 –Principais unidades aromáticas presentes na molécula	25
Figura 13 –Diferentes processos de deslignificação de biomassa	28
Figura 14 – Curvas RRC do sensor para detecção de movimentos mínimos, incluindo (a) vibração da trilha sonora, (b) deglutição, (c) respiração nasal e (d) batimento cardíaco.	31
Figura 15 –Sensor de pressão piezoresistivo.....	32
Figura 16 – Curvas de tensão-deformação à compressão e processo de compressão-recuperação do aerogel C-CNTs/MXene/CCS/LS	33
Figura 17 – Caracterização do desempenho mecano-elétrico do sensor de pressão C3-TM1..	35
Figura 18 – Testes de sensibilidade à pressão do hidrogel PVA/Lignin-Ag.....	36
Figura 19 – Caracterização do sensor de pressão flexível	37
Figura 20 – Exibição das propriedades mecânicas do hidrogel PC/CNF/LC, incluindo alongamento (a) e compressão (b), (c) 10 curvas contínuas de carga-descarga cíclica de tração e (d) tensão correspondente dos hidrogéis, (e) 10 curvas contínuas de carga-descarga cíclica de compressão e (f) tensão correspondente dos hidrogéis.	38
Figura 21 – Hidrogel condutor flexível (PC/CNF/LC): (a) Flexão dos dedos, (b) flexão da articulação do cotovelo, (c) preensão palmar.	39
Figura 22 – (a) Imagens de microscopia óptica (MO) e esquemas correspondentes mostrando as morfologias do NC-GF no PDMS com estrutura piramidal com diferentes densidades de reticulação (base de PDMS: reticulante, m/m) sob carga de pressão de 25 kPa. (b) Resultados de MEF mostrando a distribuição de deformação na estrutura piramidal com diferentes densidades de reticulação do PDMS. (c) λ wrinkle, cal e λ wrinkle na estrutura piramidal variando com a densidade de reticulação do PDMS sob carga de pressão de 25 kPa. (d) Curvas de resposta à pressão para os sensores de pressão variando com a densidade de reticulação do PDMS. (e) Imagens de MO mostrando as topografias da superfície do PDMS com estrutura piramidal 10:1 e 20:1 variando com as pressões aplicadas.....	40
Figura 23 – Gráficos: a) $\Delta R/R_0$ versus pressão, as linhas vermelhas sólidas são ajustes lineares usados para estimar o parâmetro S e b) resposta do sensor operando em ciclos sob pressão variável de 0 a 2,1 MPa.	41
Figura 24 – Amostra de PANI:Lignina (Rede) aplicada diretamente em lâmina de vidro	43

Figura 25 – Geometria do sensor (Corrosão - Versão 1)	44
Figura 26 – Imagem ilustrativa referente à técnica spin coating	45
Figura 27 – Spin coating da Apex Instruments	45
Figura 28 – Processo Blade Coating	45
Figura 29 – Blade Coater BCC-02, lâmina do tipo LC01 e mecanismo de ajuste de altura	46
Figura 30 – Lâmina LW01 (Autocoat)	47
Figura 31 – Geometria do sensor	48
Figura 32 – Aspecto do sensor depois de fabricado	48
Figura 33 – Setup experimental de um AFM	49
Figura 34 – Relação de forças que atuam entre a ponteira e a amostra em função da distância que as separa	50
Figura 35 – Curva de força versus distância de separação ponta-amostra	51
Figura 36 – Shimadzu SPM-9700HT	54
Figura 37 – Interferômetro de Luz Branca (Taylor Hobson, modelo Talysurf CCI Lite M12-3993-03)	56
Figura 38 – Teste de sensor em Máquina Universal de ensaios	59
Figura 39 – Máquina Universal de Ensaios INSTRON EMIC 23-50	60
Figura 40 – Placa Arduino® Uno R3	61
Figura 41 – Imagens AFM a) PANI, PANI:Lignina b) 3 %, c) 5 % e d) 10 %	64
Figura 42 – Módulo de Young dos filmes de PANI ou PANI:Lignina (rede) depositados sobre filme de SWCNTs/PET por blade coating	66
Figura 43 – Imagens de AFM, mapa do Módulo de Young e força de adesão, a) PANI, b) PANI:Lignina (3%) e c) PANI:Lignina (10 %)	67
Figura 44 - Espessura média	69
Figura 45 - Gráfico – Rampas – Comparativo – PANI Pura, PANI Lignina Rede 3% e PANI Lignina Rede 10%	70
Figura 46 – Gráfico - Ciclos - PANI Lignina Rede 10%	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dopagem - Resumo do Mecanismo	47
Tabela 2 –Valores de espessura e desvio padrão	68
Tabela 3 – Comparação quantitativa.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μm	Micrômetro - Unidade de medida de comprimento, equivalente a um milionésimo de metro.
AFM	Microscopia de Força Atômica - Técnica de microscopia de alta resolução para explorar superfícies.
Ag^+	Íons de Prata - Íons de prata, que são reduzidos a nanopartículas metálicas no processo de síntese.
Arduino	Arduino - Plataforma de prototipagem eletrônica de hardware e software livre.
Au-Cr	Ouro-Cromo - Revestimento de ouro e cromo utilizado em pontas de microscopia de força atômica.
C-CNTs	Nanotubos de Carbono Condutores - Nanotubos de carbono que atuam como parte de uma rede condutora.
CCS	Carboximetil Quitosana (Carboxymethyl Chitosan)
CCS/LS	Carboximetilquitosana/Lignossulfonato de Sódio - Composição de um aerogel piezorresistivo flexível.
CNF	Nanofibrilas de Celulose - Fibrilas de celulose em escala nanométrica.
CNT	Nanotubo de Carbono - Estrutura cilíndrica de carbono com propriedades elétricas e mecânicas.
CV	Coeficiente de Variação - Medida estatística da dispersão de dados em relação à média.
DMT	Derjaguin-Muller-Toporov - Modelo teórico utilizado para analisar curvas de força-indentação em microscopia de força atômica, aplicável quando as forças de adesão são significativas e a deformação é mínima.
EB	Base Esmeraldina (Emeraldine Base)
G	Guaiacila - Unidade estrutural da lignina, derivada do álcool coniferílico.
H	p-hidroxifenila - Unidade estrutural da lignina, derivada do álcool p-cumarílico.
HSG	Ligninas de gramíneas (tipo de lignina com unidades H, S e G)
ITO	Óxido de Índio e Estanho - Material condutor transparente usado como eletrodo.
JKR	Johnson-Kendall-Roberts - Modelo teórico utilizado para analisar curvas de força-indentação em microscopia de força atômica, mais apropriado para materiais macios onde as forças de adesão causam deformação antes do contato mecânico.
LC	Carbono Derivado de Lignina - Carbono obtido a partir da lignina, usado como carga condutora.
Lig.	Lignina - Biopolímero aromático derivado da biomassa lignocelulósica.
LMM	Lignina de Madeira Moída - Tipo de lignina considerada mais representativa da estrutura nativa, pois minimiza alterações estruturais durante o isolamento.

MWCNT	Nanotubos de Carbono de Parede Múltipla - Nanotubos de carbono com múltiplas camadas concêntricas de grafeno.
MXene	O MXene é derivado de um material precursor chamado fase MAX, que tem a fórmula geral $M(n+1)AX_n$. No processo de síntese do MXene, a camada "A" (que geralmente é um elemento do grupo principal, como Alumínio (Al) ou Silício (Si)) é seletivamente removida da fase MAX, abandonando as camadas M e X, com a superfície funcionalizada pelos grupos Tx.
NaOH	Hidróxido de Sódio - Composto químico utilizado no processo Kraft e Soda para extração de lignina.
NC-GF	Filmes Finos de Ouro Nanocraquelados - Filmes de ouro com nanocraqueladuras, usados como eletrodos em sensores de pressão.
PANI	Polianilina - Polímero condutor amplamente utilizado em sensores devido à sua síntese simplificada, estabilidade e propriedades elétricas ajustáveis.
PANI-EB	Base de Esmeraldina de Polianilina - Forma parcialmente oxidada da polianilina, que pode ser condutora ou isolante dependendo do nível de dopagem.
PANI-ES	Sal de Esmeraldina de Polianilina - Forma condutora da polianilina, obtida pela protonação da base esmeraldina.
PANI-PB	Base de Pernigranilina de Polianilina - Forma totalmente oxidada da polianilina, com comportamento dielétrico.
R	Resistência Elétrica - Medida da oposição ao fluxo de corrente elétrica.
R ₀	Resistência Elétrica Inicial - Resistência elétrica do sensor antes da aplicação de pressão.
R ₁	Resistência do Sensor - Resistência elétrica do sensor em um circuito.
R ₂	Resistência de Referência - Resistência elétrica conhecida utilizada em um circuito divisor de tensão.
R ²	Coeficiente de Determinação - Medida estatística que indica o quão bem um modelo de regressão se ajusta aos dados.
SWCNT	Nanotubos de Carbono de Parede Simples - Estruturas cilíndricas formadas por uma única camada de átomos de carbono, com alta flexibilidade mecânica, condutividade elétrica e sensibilidade à deformação.
$\Delta R/R_0$	Variação Relativa da Resistência - Medida da mudança na resistência elétrica de um material em relação à sua resistência inicial.
φ_c	Fração Volumétrica Crítica - Ponto de queda abrupta da condutividade em um sistema.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL.....	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Revisão bibliográfica sobre os materiais	18
2.1.1	Polianilina	18
2.1.2	Nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT).....	21
2.1.3	Lignina.....	23
2.2	Estado da arte sensores de pressão com base polimérica ou nanoestruturas.....	30
3	EXPERIMENTAL (MATERIAIS E MÉTODOS)	42
3.1	Materiais.....	42
3.2	Preparo das soluções.....	42
3.2.1	Preparação das soluções PANI:Lignina (rede).....	42
3.2.2	Preparação de solução de SWCNTs.....	43
3.3	Técnicas de processamento.....	43
3.3.1	Preparação dos substratos PET/ITO.....	43
3.3.2	Produção dos filmes de SWCNTs	44
3.3.3	Produção dos filmes de PANI:Lignina (rede).....	46
3.3.4	Processo de Dopagem da Polianilina.....	47
3.4	Técnicas de caracterização	48
3.4.1	Microscopia de força atômica	48
3.4.2	Perfilometria Óptica por Interferometria de Luz Branca.....	55
3.4.3	Caracterização eletromecânica dos sensores de pressão	58
4	RESULTADOS.....	62
4.1	Análises de Microscopia de Força Atômica (AFM).....	62
4.1.1	Análise Morfológica e Fase	62
4.1.2	Mapeamento Mecânico por AFM: Impacto da Lignina no Módulo de Young e Força de adesão.....	65
4.2	Perfilometria Óptica	68
4.3	Caracterização eletromecânica	70

4.3.1	Avaliação da Resposta Piezorresistiva de Compósitos PANI/Lignina sob Pressão Controlada.....	70
4.3.2	Posicionamento em relação ao estado da arte.....	72
5	CONCLUSÃO	73
5.1	A Lignina como Elemento Funcional em Sensores Piezorresistivos Flexíveis de SWCNTs/Polianilina	73
5.2	Trabalhos futuros.....	75
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

A investigação científica sobre eletrodos flexíveis para sensores de pressão acumula décadas de desenvolvimento. A motivação principal reside na necessidade industrial de monitoramento estrutural preditivo, visando identificar falhas antes do colapso total. Simultaneamente, a área médica requer dispositivos integráveis a próteses para a captação contínua de sinais vitais. O setor de tecnologias vestíveis, por sua vez, demanda componentes imperceptíveis ao usuário. Essa diversidade de aplicações resulta em exigências específicas por área, as quais convergem para um desafio técnico central: o desenvolvimento de dispositivos operantes em amplas faixas de pressão, variando de poucos kPa a dezenas de MPa (Seesaard; Wongchoosuk, 2023).

As especificidades de cada aplicação direcionam os requisitos de projeto. No contexto industrial, a robustez mecânica é fundamental, visto que a falha do sensor sob pressões elevadas compromete a integridade do monitoramento de equipamentos. A Figura 1 mostra exemplo de sensor industrial de pressão.

Em contrapartida, as aplicações médicas priorizam a alta sensibilidade em detrimento da resistência mecânica extrema. A pressão exercida por uma prótese sobre a pele, por exemplo, apresenta magnitude sutil, frequentemente inferior ao limite de detecção dos sensores industriais convencionais. A caracterização dessas variações de baixa amplitude, típicas do contexto clínico, é apresentada na Figura 2 (Xiao et al., 2023) mostra exemplo de aplicação de sensores de pressão arterial.

Figura 1 – Exemplo de sensor de pressão piezorresistivo utilizado em equipamentos e tubulações industriais



Fonte: (Fuji Electric, 2026)

Figura 2 – Exemplo de aplicação de sensores de pressão nos monitores de pressão arterial



Fonte: (WF Sensors, 2026)

A literatura demonstra a inviabilidade de desenvolvimento de um sensor de pressão universal capaz de atender a todas as demandas operacionais. Dispositivos móveis e tecnologias vestíveis, por exemplo, operam em faixas de baixa pressão, compreendidas entre 0,1 e 100 kPa, conforme ilustrado na Figura 3 (Rodgers; Pai; Conroy, 2015). Em contrapartida, no âmbito da engenharia civil, os requisitos operacionais atingem magnitudes significativamente maiores, variando de 0,1 a 12 MPa. A Figura 4 (Herbert, 2006) apresenta aplicação para segurança estrutural. Aplicações industriais específicas, a exemplo do setor papeleiro, apresentam demandas ainda mais rigorosas, nas quais os equipamentos operam sob pressões da ordem de 7 a 9 MPa.

Figura 3 – Exemplo de sensor de monitoramento de pressão intracraniano



Fonte: (Brain4care, 2026)

Figura 4 – Exemplo de sensor de pressão acoplado à uma célula de carga monitorando uma ponte.



Fonte: (© LAUMAS Elettronica S.r.l., 2026)

Figura 5 – Exemplo de sensores de pressão acoplados a tubulações e equipamentos industriais (em amarelo).



Fonte: (VEGA, 2026)

Os polímeros condutores e os nanomateriais de carbono figuram como elementos promissores para a fabricação desses sensores. Uma ênfase particular é direcionada aos nanotubos de carbono de parede simples, designados pela sigla SWCNTs (Sun et al., 2024). A relevância científica desses materiais reside na convergência de propriedades singulares, englobando flexibilidade mecânica, elevada condutividade elétrica e alta sensibilidade à deformação. O mecanismo de detecção ocorre por meio da alteração estrutural sob estresse mecânico. A aplicação de pressão promove a aproximação das estruturas condutoras internas, o que reconfigura as rotas de percolação elétrica e resulta na variação da resistência do material. Tal comportamento físico é formalmente denominado efeito piezorresistivo (Xu; Xing, 2025).

A polianilina (PANI) figura entre os polímeros condutores mais empregados nesta área. Sua ampla utilização é justificada pela síntese simplificada, alta estabilidade em condições ambientais e propriedades elétricas adequadas para tais aplicações (Bhadra; Alkareem; Al-Thani, 2020). A incorporação de SWCNTs à matriz polimérica promove o incremento simultâneo da condutividade elétrica e da resistência mecânica do compósito resultante (Wu et al., 2018). Contudo, um desafio técnico significativo emerge sob condições de pressão elevada. Em tais regimes, a

resposta elétrica do dispositivo apresenta saturação prematura, impossibilitando a cobertura de toda a faixa operacional requerida (Gonçalves, 2015).

Sensores de pressão com base em SWCNTs e PANI foram estudados por MACHADO, (2024), os resultados mostraram que o sensor apresenta duas faixas lineares de operação até 2 MPa, acima deste valor o sensor não apresenta variações de resistência elétrica sob aplicação de pressão. Entre a faixa de pressão de 0.30-0.45 MPa a sensibilidade (S) permaneceu no valor de $2.20 \pm 0.26 \text{ MPa}^{-1}$ e na faixa entre 0.46 e 2.20 MPa na ordem de $0.28 \pm 0.01 \text{ MPa}^{-1}$.

A lignina consiste em um biopolímero aromático derivado da biomassa lignocelulósica. Apesar de sua ampla disponibilidade, este material é frequentemente descartado como subproduto industrial devido à complexidade associada ao seu processamento (Arias-Ferreiro et al., 2022). A adição em matrizes condutoras promove o aprimoramento das propriedades mecânicas e térmicas do material. Simultaneamente, esta integração possibilita a ampliação da faixa de pressão na qual o dispositivo opera em regime forma linear (Arias-Ferreiro et al., 2022; Costa, 2024; Moreno; Sipponen, 2020).

Na literatura, alguns estudos reportam sensores piezorresistivos com base em compósitos e lignina. Por exemplo, Wang et al., 2022 reporta sensores flexíveis e recicláveis baseados em espuma de poliuretano (PU), lignina e MWCNTs, alcançando faixa de compressão 0-90% (até 275,95 kPa), *gauge factor* máximo de 2,75 (30-60% *strain*), limite de detecção de 3,64 Pa e deformação mínima de 0,23%, com estabilidade após 2000 ciclos a 40% *strain* e tempo de resposta de 36 ms, sem perda de morfologia após 12h em água destilada. A espuma é degradável em meio alcalino, permitindo reciclagem dos MWCNTs sem perda de desempenho, ideal para eletrônica vestível sustentável.

Neste trabalho, a lignina é incorporada na matriz de PANI durante a síntese, formando compósitos PANI:lignina (rede) com concentrações de lignina em relação à PANI de 0%, 3%, 5% e 10 %. O aumento gradual da lignina visa o controle da faixa linear de operação dos sensores de pressão, otimizando a resposta piezorresistiva e estabilidade sob operação em ciclos.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os materiais e sensores reportados na literatura, o capítulo 3 o detalhamento experimental, o capítulo

4 apresenta os resultados e o capítulo 5 sumariza as principais conclusões do trabalho.

Esta dissertação tem por objetivos:

1.1 OBJETIVO GERAL

- Produzir sensores de pressão flexíveis com base em Polianilina:lignina (rede) e nanotubos de carbono.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Processar filmes finos de nanotubos de carbono e PANI:Lignina (rede) pelo método de blade coating;
- Controlar espessura e homogeneidade pelos parâmetros de deposição (velocidade, temperatura do substrato e distância blade-amostra);
- Avaliar espessura, morfologia e rugosidade dos filmes resultantes;
- Avaliar a resposta do sensor sobre aplicação de pressão (rampa e ciclos);
- Avaliar o efeito da proporção PANI:Lignina na resposta do sensor de pressão.

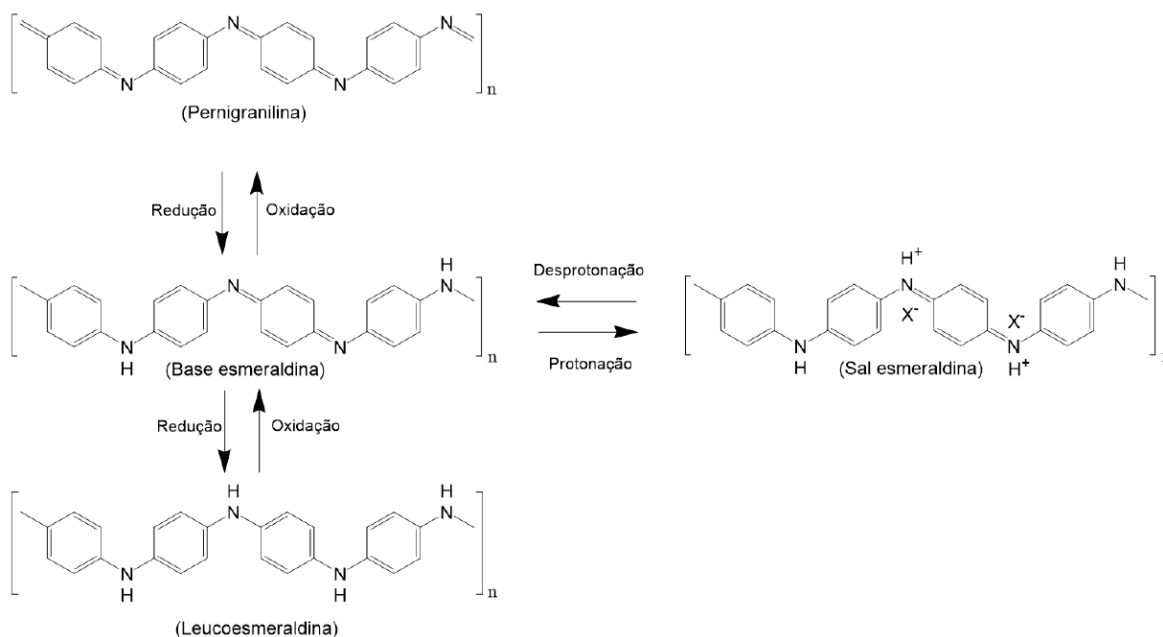
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Revisão bibliográfica sobre os materiais

2.1.1 Polianilina

A polianilina (PANI) entre os polímeros condutores de maior versatilidade na literatura contemporânea. A relevância deste material reside na convergência de características singulares, englobando alta estabilidade, processo de síntese simplificado e condutividade elétrica modulável. Esta propriedade elétrica pode ser ajustada em uma ampla escala, variando de $\sim 10^{-9}$ a $\sim 10^2 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$, em função do seu grau de dopagem, comportamento este evidenciado na Figura 6. Tais propriedades consolidam a viabilidade do polímero para diversas aplicações tecnológicas, incluindo o desenvolvimento de sensores químicos e biológicos, sistemas eletrocromicos, capacitores e eletrodos flexíveis (MACHADO, 2024).

Figura 6 – Estrutura química da Polianilina



Fonte: (HADANO, 2020)

Sob a ótica da viabilidade técnica e econômica, a PANI demonstra elevada vantagem competitiva. A anilina, seu monômero precursor, apresenta custo comercial reduzido quando comparada a outros precursores de polímeros condutores.

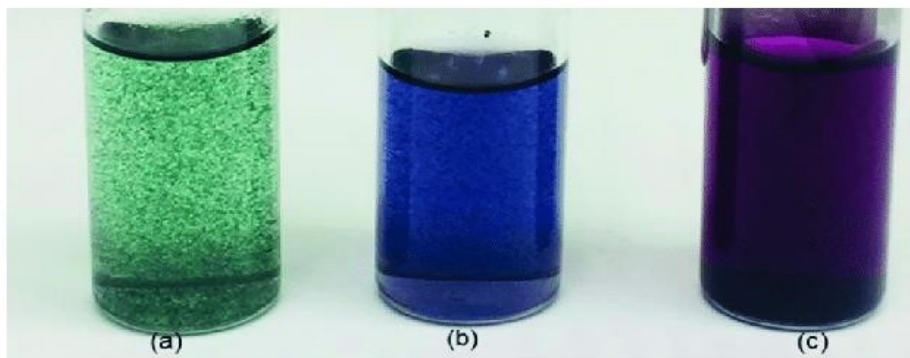
O seu processo de síntese dispensa infraestrutura laboratorial complexa e aparatos de alto valor agregado. A modulação de suas propriedades elétricas é viabilizada por meio de métodos de dopagem acessíveis (Beygisangchin et al., 2021).

A estrutura química da PANI possibilita a sua existência em distintos estados de oxidação, cujas transições ocorrem de maneira reversível mediante a troca de elétrons com o meio, conforme ilustrado na Figura 6 (Beygisangchin et al., 2021). Em sua forma de base, tais estados são classificados em três estruturas idealizadas. A leucoesmeraldina corresponde ao estado totalmente reduzido ($x = 0$). A esmeraldina representa o estado parcialmente oxidado, exibindo uma proporção aproximada de 1:1 entre as unidades benzenoides e quinonoides ($x = 0,5$). Por fim, a pernigranilina constitui a forma totalmente oxidada ($x = 1$). Cada configuração estrutural confere ao polímero propriedades ópticas e elétricas singulares (Beygisangchin et al., 2021).

A leucoesmeraldina exibe coloração amarelada ou incolor e possui um comportamento predominantemente isolante. A pernigranilina, de tonalidade púrpura, compartilha da mesma natureza dielétrica. A esmeraldina, por sua vez, evidencia uma dualidade comportamental em função do nível de dopagem. Esta estrutura pode atuar como condutora em sua forma de sal, apresentando coloração verde, ou como isolante em sua forma de base, de coloração azul, conforme ilustrado na Figura 3. Tal versatilidade consolida a esmeraldina como o estado mais estável e amplamente investigado da PANI. Em sua forma protonada, o sal de esmeraldina pode atingir valores de condutividade da ordem de $30 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (Beygisangchin et al., 2021).

O mecanismo de maior relevância tecnológica da PANI consiste na protonação da base esmeraldina em meio ácido, resultando em sua conversão para o estado de sal de esmeraldina. Este processo promove um incremento na condutividade elétrica de até dez ordens de grandeza, alcançando patamares entre 1 e $100 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$. Cumpre ressaltar que tal tratamento não altera o estado de oxidação inicial da cadeia polimérica. Simultaneamente, ocorre uma alteração óptica do azul para o verde, conforme ilustrado na Figura 7. Esta transformação macroscópica viabiliza a aplicação do polímero em dispositivos dependentes de resposta óptica (MACHADO, 2024).

Figura 7 – Identificação por cor das fases da PANI obtidas com os processos de purificação: (a) sal de esmeraldina de polianilina (PANI-ES), (b) base de esmeraldina de polianilina (PANI-EB) e (c) base de pernigranilina de polianilina (PANI-PB).



Fonte: (Mota et al., 2019)

Em escala molecular, o processo de dopagem consiste na protonação preferencial dos átomos de nitrogênio imínicos presentes na cadeia polimérica. Tal fenômeno promove a formação de cátions radicais, denominados polarons, os quais atuam como portadores de carga do material (Payerne, 2004). Sob concentrações elevadas do agente dopante, ocorre a recombinação destes polarons, resultando na formação de bipolarons (Fayad, 2010). A mobilidade destas estruturas ao longo da cadeia é o mecanismo responsável por viabilizar a condução elétrica na PANI em seu estado dopado.

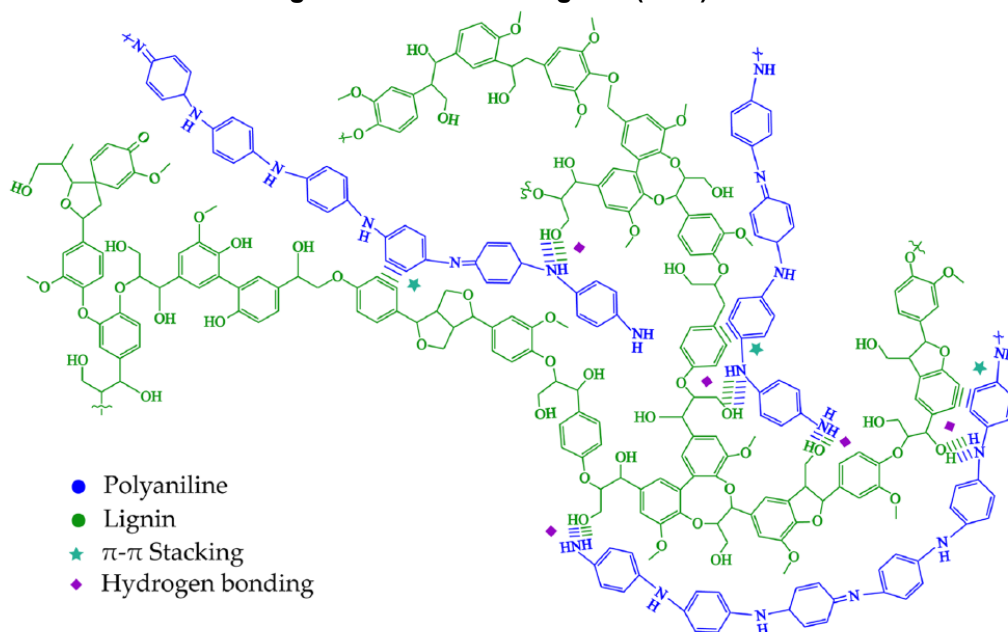
O transporte de portadores de carga na PANI não se desenvolve de maneira contínua ao longo da cadeia polimérica. O mecanismo predominante consiste no *hopping*, processo no qual os portadores migram entre domínios estruturalmente ordenados, transpondo regiões amorfas que atuam como barreiras energéticas (Payerne, 2004). Tal comportamento justifica a dependência da condutividade elétrica em relação a fatores como temperatura, morfologia e grau de dopagem, corroborando as observações experimentais (Payerne, 2004). A incorporação de nanomateriais, a exemplo dos nanotubos de carbono, promove a formação de caminhos condutores. Esta integração estrutural resulta em um incremento expressivo na condutividade do compósito (Payerne, 2004).

A PANI demonstra notável capacidade de integração com matrizes distintas. A sua configuração molecular viabiliza processos de funcionalização e a incorporação de compostos variados. Esta convergência de materiais resulta na formação de compósitos que evidenciam efeito sinérgico, exibindo desempenho operacional superior ao de seus constituintes isolados. Tais propriedades otimizadas consolidam

a aplicação destas estruturas em sensores, supercapacitores e dispositivos eletroquímicos. (Payerne, 2004).

Neste contexto, a lignina *kraft* se mostra relevante, por conta de ser o principal subproduto da indústria de celulose, este material é frequentemente destinado à incineração ou ao descarte. A incorporação deste polímero em misturas com PANI representa uma estratégia que alia viabilidade técnica à valorização de resíduos industriais, conforme ilustrado na Figura 8. A literatura reporta a viabilidade de utilizar até 36% de lignina em massa nestas formulações. O processamento ocorre via *casting*, método que dispensa infraestrutura laboratorial de alta complexidade (Rodrigues et al., 2001). Tais formulações preservam propriedades eletroquímicas funcionais, exibindo adequada homogeneidade morfológica. As interações químicas entre os constituintes são corroboradas por análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e voltametria cíclica (Rodrigues et al., 2002). A presente pesquisa investiga se estas características estruturais e químicas promovem a otimização do desempenho dos sensores de pressão desenvolvidos.

Figura 8 – Polianilina:lignina (rede)



Fonte: (Xiao et al., 2023)

2.1.2 Nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT)

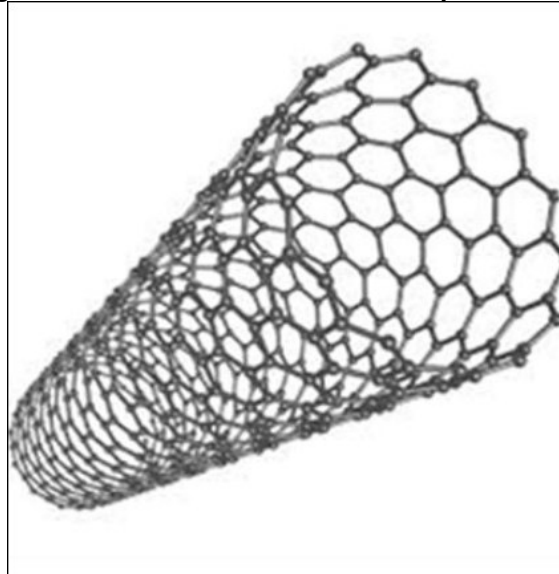
Os nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT) consistem em estruturas cilíndricas formadas por uma única camada de átomos de carbono

arranjados em uma rede hexagonal, análogas a uma folha de grafeno conformada em geometria tubular (Bajaj; Favata; Podio-Guidugli, 2013). Desde a sua identificação no início da década de 1990, tais materiais evidenciam propriedades singulares, com destaque para a excepcional resistência mecânica, elevada condutividade elétrica e baixa densidade. Estas características estão presentes em estruturas cujos diâmetros se situam na escala nanométrica (HATA, 2016; Souza Jr et al., 2011).

2.1.2.1 Estrutura e Propriedades

Os SWCNTs são constituídos por átomos de carbono com hibridização sp^2 , apresentando conformação cilíndrica com diâmetros entre 0,4 e 2,5nm e comprimentos que variam da escala micrométrica à milimétrica, conforme ilustrado na Figura 9 (Zhang et al., 2021a). Sob a perspectiva das aplicações mecânicas, o módulo de Young assume papel de destaque. Este parâmetro é avaliado em aproximadamente 1,25 TPa , com incerteza associada entre 0,35 a 0,45 TPa , a depender da metodologia de aferição empregada (Broza, 2010). Em termos comparativos, o aço estrutural possui módulo de elasticidade próximo a 200 GPa . Tais valores indicam que estas nanoestruturas exibem rigidez aproximadamente seis vezes superior à do referido metal, aliada a uma densidade extremamente reduzida.

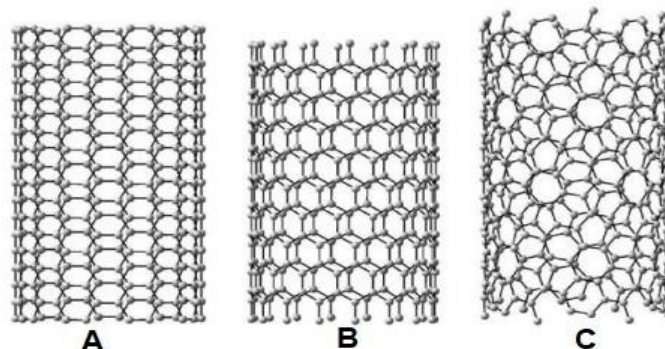
Figura 9 – Nanotubos de carbono de parede simples



Fonte: (M. A. Alsharef; Taha; Ahmed Khan, 2017)

O comportamento elétrico de um SWCNT, seja ele metálico ou semicondutor, é intrinsecamente definido pela orientação cristalográfica adotada durante a conformação tubular da folha de grafeno. Tal orientação é matematicamente descrita pelos índices quirais (n, m) , de modo que variações nestes parâmetros promovem alterações substanciais no caráter eletrônico do nanomaterial (Monavari et al., 2023). As estruturas classificadas como *armchair*, caracterizadas pela condição $n = m$ e por um ângulo quiral de 30° , conforme ilustrado na Figura 10(a), exibem condutividade metálica. Em contrapartida, os nanotubos que satisfazem a condição $n - m \neq 3i$ (sendo i um número inteiro) apresentam uma banda de energia proibida (*band gap*) da ordem de 1eV , atuando, portanto, como semicondutores (Mittal; Kumar, 2014). Conclui-se, assim, que a resposta eletrônica destas estruturas é estritamente dependente de sua configuração geométrica.

Figura 10 – Nanotubos de carbono: a) nanotubos *armchair*, ângulo quiral ($\theta = 30^\circ$), b) zigue-zague, ângulo quiral ($\theta = 0^\circ$) e c) quiral, com ângulo quiral entre $0^\circ < \theta < 30^\circ$.

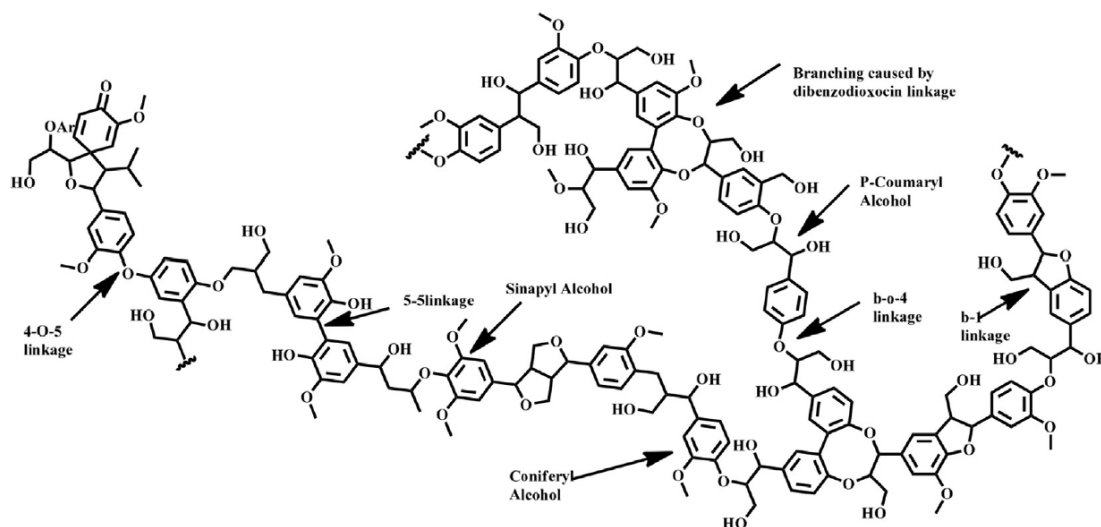


Fonte: (Popov, 2004)

2.1.3 Lignina

A lignina ilustrada na Figura 11 é o segundo polímero orgânico natural mais abundante do planeta, ficando atrás apenas da celulose. O próprio nome já entrega sua origem: vem do latim *lignum*, que significa madeira. O composto se concentra sobretudo na parede celular e na lamela média de gimnospermas e angiospermas, onde desempenha um papel importante: dá resistência mecânica aos tecidos, participa do transporte de água e nutrientes e ainda atua como barreira contra microrganismos (Azadi et al., 2013; Saliba et al., 2001).

Figura 11 – A estrutura detalhada da lignina com vários tipos de ligações e representantes.

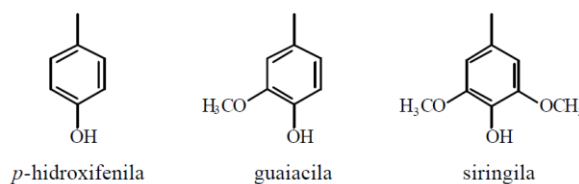


Fonte: (Kumar et al., 2020)

Do ponto de vista químico, a lignina é um polímero amorfo de natureza aromática, formado por unidades fenilpropanóides do tipo C_6C_3 , ou unidades C_9 , conectadas de maneira irregular por diferentes tipos de ligações. A biossíntese parte da polimerização desidrogenativa de três álcoois precursores: o p-cumarílico, o coniferílico e o sinapílico. Cada um origina uma unidade estrutural distinta, respectivamente denominadas p-hidroxifenila (H), guaiacila (G) e siringila (S) (Saliba et al., 2001).

O que determina a proporção entre essas unidades é, basicamente, a origem botânica da planta. Ligninas de madeiras moles, as gimnospermas, são compostas predominantemente por unidades G; as de madeiras duras, angiospermas, combinam unidades G e S; já as gramíneas reúnem os três tipos, sendo classificadas como H-G-S (Saliba et al., 2001). Essa variação composicional condiciona diretamente a reatividade da lignina e, por consequência, as estratégias possíveis para seu aproveitamento.

Figura 12 –Principais unidades aromáticas presentes na molécula de lignina



Fonte: (Dos Santos, 2001)

Os principais grupos funcionais presentes na macromolécula são as hidroxilas alifáticas e fenólicas, os grupos metoxílicos, as carbonilas e os éteres, cada um com implicações distintas para a reatividade do polímero. O teor de metoxilas funciona como uma espécie de impressão digital da lignina: em madeiras moles fica entre 12 e 16%, ao passo que em madeiras duras chega a 18 a 22% (Saliba et al., 2001). A determinação desses grupos combina métodos químicos e espectroscópicos: espectroscopia no infravermelho (IV), ressonância magnética nuclear de ^1H e ^{13}C , e reações de degradação oxidativa com nitrobenzeno ou permanganato de potássio (Saliba et al., 2001).

No espectro de IV, cada região de absorção entrega informação sobre um tipo de ligação ou grupo funcional. A banda em torno de 1270 cm^{-1} , por exemplo, é atribuída às ligações C-O de anéis guaiacílicos; a região de 1140 cm^{-1} , a C-O de álcoois secundários (Azadi et al., 2013). A RMN de ^{13}C , introduzida por Nimz em 1976, mudou o que era possível enxergar na estrutura da lignina. Com ela, tornou-se viável identificar os diferentes tipos de ligações, como β -O-4, β -5 e β - β , com grau de detalhamento que os métodos anteriores não alcançavam (Saliba et al., 2001).

A complexidade vai além da variação entre espécies: a composição muda entre partes distintas de um mesmo vegetal e responde às condições edafoclimáticas de crescimento. Qualquer modelo de estrutura única é, portanto, uma aproximação honesta, não uma representação universal. O que existem são representações úteis, cada uma válida dentro de certo contexto (Saliba et al., 2001).

No plano físico, a lignina não tem organização cristalina, diferentemente da celulose. Sua massa molecular é alta e se distribui de forma heterogênea, o que pode ser avaliado por cromatografia de permeação em gel (CPG) (Saliba et al., 2001). Essa natureza amorfa dificulta a interpretação dos espectros de IV pelo método de grupos

de teoria, tornando necessário o uso de compostos-modelo para atribuição correta das bandas de absorção (Saliba et al., 2001).

Termicamente, a lignina se comporta como um polímero viscoelástico: sua resposta mecânica depende da taxa de deformação, e o material exibe fluência e relaxação sob carga (Dos Santos, 2001). A temperatura de transição vítrea varia com o teor de umidade e com o processo de extração, o que tem consequências diretas para qualquer aplicação que envolva processamento térmico. A porosidade importa mais do que costuma parecer: ligninas obtidas por Kraft, organossolve e hidrólise enzimática chegam com porosidades bem diferentes, e isso se reflete diretamente nas propriedades macroscópicas do material (Schwaighofer et al., 2023).

Os métodos de isolamento produzem ligninas com características físico-químicas diferentes das da protolignina original, e isso não é consequência marginal: é o centro do problema para quem quer usar a lignina como matéria-prima. Os processos incluem o método de Klason por hidrólise ácida, os processos organossolve, a extração com ácido tioglicólico e a obtenção de subprodutos industriais como a lignina Kraft e a lignina sulfítica. O método de lignina de madeira moída (LMM) é considerado o mais representativo da estrutura nativa porque minimiza as alterações estruturais durante o isolamento (Saliba et al., 2001).

As propriedades mecânicas da lignina têm sido investigadas com crescente sofisticação, sobretudo com o avanço das técnicas de nanoindentação. Estudos recentes mostraram algo que, à primeira vista, surpreende: independentemente da origem botânica ou do processo de extração, a lignina sólida apresenta propriedades mecânicas intrínsecas notavelmente consistentes (Schwaighofer et al., 2023). O módulo de Young foi identificado em aproximadamente 7,1 GPa, com módulo de indentação reduzido de cerca de 8,4 GPa. Esses números batem com os obtidos por microscopia de força atômica e por nanoindentação na lamela média de células de madeira de coníferas (Schwaighofer et al., 2023).

A dureza foi estimada em torno de 0,57 GPa a partir de relações de escala entre dureza e densidade de empacotamento para materiais porosos coesivo-friccionais (Dos Santos, 2001). Os valores absolutos, porém, merecem cautela: são sensíveis à taxa de deformação e ao caráter viscoelástico do material (Schwaighofer et al., 2023).

Um aspecto central revelado pelas análises de nanoindentação em grade é que as propriedades mecânicas das amostras de lignina técnica prensada a quente

são governadas pela porosidade, e não pela origem ou pelo método de extração. Módulos de indentação medidos em amostras porosas variaram entre 1,8 e 7,0 GPa, e durezas entre 0,09 e 0,40 GPa, em função direta do grau de porosidade (Schwaighofer et al., 2023). O modelo de homogeneização de Mori-Tanaka permitiu isolar a contribuição da porosidade e revelar as propriedades intrínsecas do material. O resultado é direto: a rigidez da lignina sólida é virtualmente a mesma para ligninas de fontes e processos distintos (Schwaighofer et al., 2023).

Essa convergência mecânica é um dado subestimado na literatura. Embora a estrutura química e as propriedades físicas variem consideravelmente conforme a origem e o processamento, a resposta mecânica intrínseca parece ser uma característica robusta do polímero, relativamente independente de sua história de processamento. Para aplicações em compósitos e materiais estruturais, isso é uma vantagem concreta: significa que a lignina pode ser tratada como um componente com propriedades mecânicas previsíveis, desde que a porosidade seja controlada. E para as biorrefinarias, que ainda queimam grande parte da lignina que produzem, esse entendimento abre caminho para uma conversa diferente sobre o que fazer com esse material (Azadi et al., 2013).

2.1.3.1 Processos de Deslignificação de Biomassa

A lignina pode ser extraída da biomassa lignocelulósica por diferentes rotas, organizadas em dois grupos principais: processos sulfúricos e processos livres de enxofre, como ilustra a Figura 13 (Saliba et al., 2001).

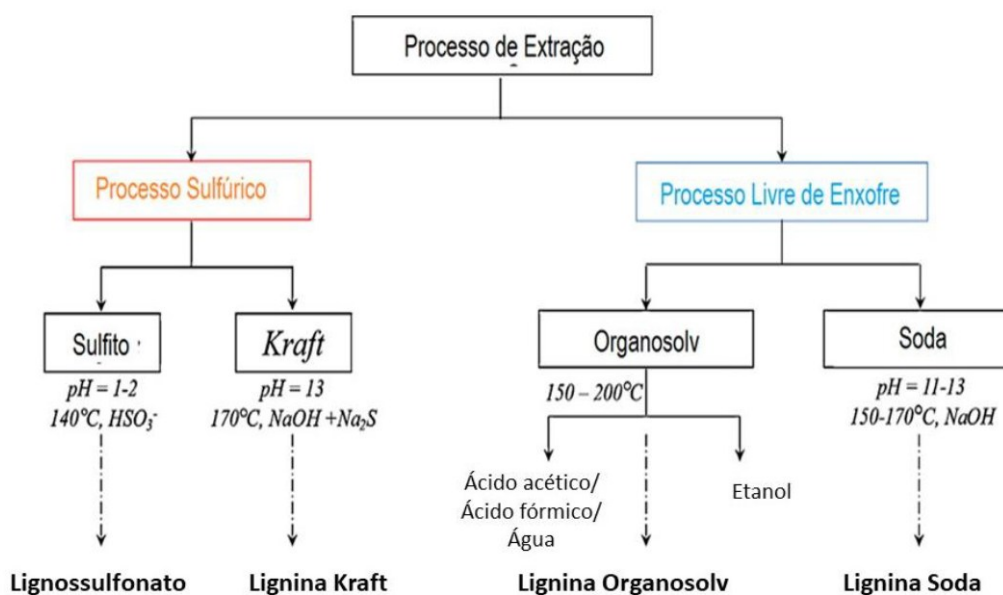
Os processos sulfúricos reúnem duas rotas bem estabelecidas: o processo sulfito e o processo Kraft. No processo sulfito, a deslignificação acontece em condições ácidas (pH 1-2), a 140°C, com bissulfito (HSO_3^-) como reagente. O produto é a lignossulfonato, solúvel em água e bastante usada como dispersante e plastificante (Azadi et al., 2013). O processo *Kraft* opera em meio fortemente alcalino (pH 13), a 170°C, com solução de NaOH e Na_2S . Produz a lignina Kraft, atualmente o tipo técnico mais abundante no mundo, gerado como subproduto da indústria de celulose e papel. Só esse fato já justifica atenção especial ao processo (Fernandes; Petri, 2026).

Os processos livres de enxofre evitam a incorporação de átomos de enxofre na estrutura do polímero, o que abre possibilidades para aplicações de maior valor agregado. O processo *Organosolv* opera entre 150 e 200°C com solventes orgânicos,

como ácido acético, ácido fórmico ou misturas de água e etanol, e produz uma lignina de alta pureza, com baixo teor de carboidratos e estrutura relativamente próxima da protolignina nativa (Fernandes; Petri, 2026; Saliba et al., 2001). O processo Soda utiliza NaOH em condições alcalinas (pH 11-13) a temperaturas entre 150 e 170°C, sendo especialmente aplicado a biomassas não madeirosas, como palhas e bagaços, produzindo a lignina soda, livre de enxofre e com potencial concreto para compósitos poliméricos (Fernandes; Petri, 2026).

A escolha do processo não é detalhe operacional. Ela determina a estrutura química, a pureza, o peso molecular e as propriedades funcionais da lignina obtida, e cada uma dessas variáveis condiciona o que é possível fazer com o material depois. Uma lignina *Kraft* de alta disponibilidade, mas carregada de enxofre; uma *Organosolv* mais limpa, mas de produção ainda cara; uma soda adequada para certas biomassas, mas menos estudada para outras. A rota de extração, em última análise, já é parte da decisão sobre a aplicação final (Fernandes; Petri, 2026).

Figura 13 –Diferentes processos de deslignificação de biomassa



Fonte: (Fernandes; Petri, 2026)

2.1.3.2 Lignina tipo lignossulfonato

A lignossulfonato é obtida pelo processo sulfito, no qual a madeira picada é tratada com solução aquosa de bissulfito (HSO_3^-) em meio ácido. Nessa etapa, a lignina reage com os íons bissulfito e incorpora grupos sulfonatos ($-\text{SO}_3^-$), o que a

torna solúvel em água. Essa solubilidade não é detalhe: é o que define o comportamento da lignossulfonato em praticamente todas as suas aplicações. O licor residual que sai do processo carrega, além dos lignossulfonatos, açúcares, ácidos orgânicos e subprodutos de hemicelulose. A recuperação pode ser feita por precipitação, ultrafiltração ou osmose inversa, e a escolha entre elas depende da escala e da pureza desejada para o produto. Nenhuma das três isenta de custo ou de perda de material (Fernandes; Petri, 2026).

2.1.3.3 Lignina tipo Kraft

A lignina *Kraft* é o tipo de maior produção industrial no mundo. Ela resulta da polpação Kraft, processo que usa hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, o chamado licor branco, em condições fortemente alcalinas e temperaturas entre 150 e 170 °C para clivar as ligações éter da estrutura do polímero. A recuperação se dá a partir do licor negro, por acidificação com ácido sulfúrico ou CO₂. As tecnologias comerciais mais consolidadas para essa etapa são o *LignoBoost* e o *LignoForce*.

Grande parte da lignina *Kraft* ainda é queimada dentro das próprias fábricas para geração de energia. É um desperdício difícil de justificar, especialmente diante do volume produzido e das alternativas de valorização disponíveis. O potencial está ali, à espera de uma decisão industrial que ainda não chegou em escala (Schwaighofer et al., 2023). Em comparação com a lignina *organosolv*, a lignina *Kraft* apresenta caráter mais apolar, propriedade que contribui para seu potencial antibacteriano documentado na literatura (Fernandes; Petri, 2026).

2.1.3.4 Lignina tipo Soda

a lignina soda é obtida pelo tratamento de materiais lignocelulósicos com hidróxido de sódio, que dissolve a lignina da matriz, seguido de precipitação ácida, maturação e filtração. O resultado é uma lignina livre de enxofre, e essa característica a coloca em posição mais favorável do que as ligninas *Kraft* e sulfito para aplicações que exigem maior pureza química e compatibilidade com sistemas biológicos.

Em fontes não madeireiras, porém, a recuperação complica. O elevado teor de ácido carboxílico gerado pela oxidação de grupos hidroxila alifáticos dificulta a filtragem, e o aquecimento passa a ser necessário para viabilizar a coagulação do material (Fernandes; Petri, 2026). Não é um obstáculo intransponível, mas é o tipo de

detalhe que eleva custo operacional e limita a escala. Para biomassas agrícolas como bagaço e palha, onde o processo soda tem maior aplicação, esse ponto merece atenção antes de qualquer projeção de viabilidade industrial (Fernandes; Petri, 2026).

2.1.3.5 Lignina tipo *organosolv*

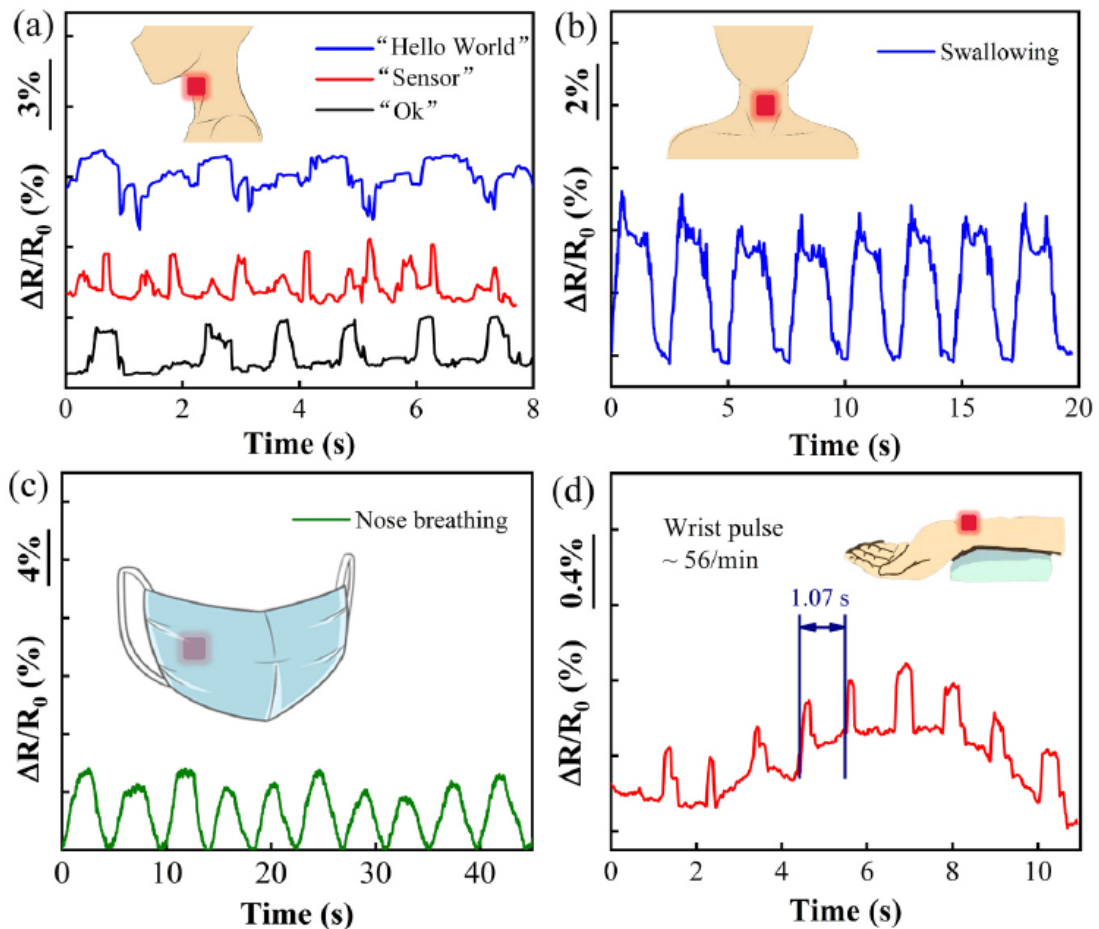
A lignina *organosolv* é obtida por deslignificação com solventes orgânicos, como etanol, ácido fórmico, ácido acético e metanol. Em comparação com as ligninas sulfonada e *Kraft*, o perfil da *organosolv* é visivelmente mais limpo: sem enxofre na estrutura, com maior capacidade de derivação, menor teor de cinzas e de carboidratos, massa molar geralmente mais baixa e menor polaridade (Fernandes; Petri, 2026).

Por essas características, a *organosolv* é frequentemente apontada como a mais próxima da lignina nativa e, na prática, a que oferece maior potencial para aplicações de alto valor agregado. O problema é que o processo custa caro, e esse custo ainda não foi resolvido em escala industrial. Uma lignina de alta qualidade que poucos conseguem produzir competitivamente (Fernandes; Petri, 2026).

2.2 Estado da arte sensores de pressão com base polimérica ou nanoestruturas

Na literatura, é comum encontrar sensores de pressão com diferentes geometrias e mecanismos de transdução. O que mais se vê, porém, são as respostas piezoresistiva e capacitiva para o monitoramento da pressão. Um exemplo complexo, mas notável, é o sensor flexível baseado em aerogel de quitosana/polifosfato de amônio/montmorilonita, funcionalizado com nanofios de prata e revestido com SiO₂/PDMS (Chen et al., 2024). Abaixo na Figura 14 é possível verificar os comportamentos em situações de monitoramento.

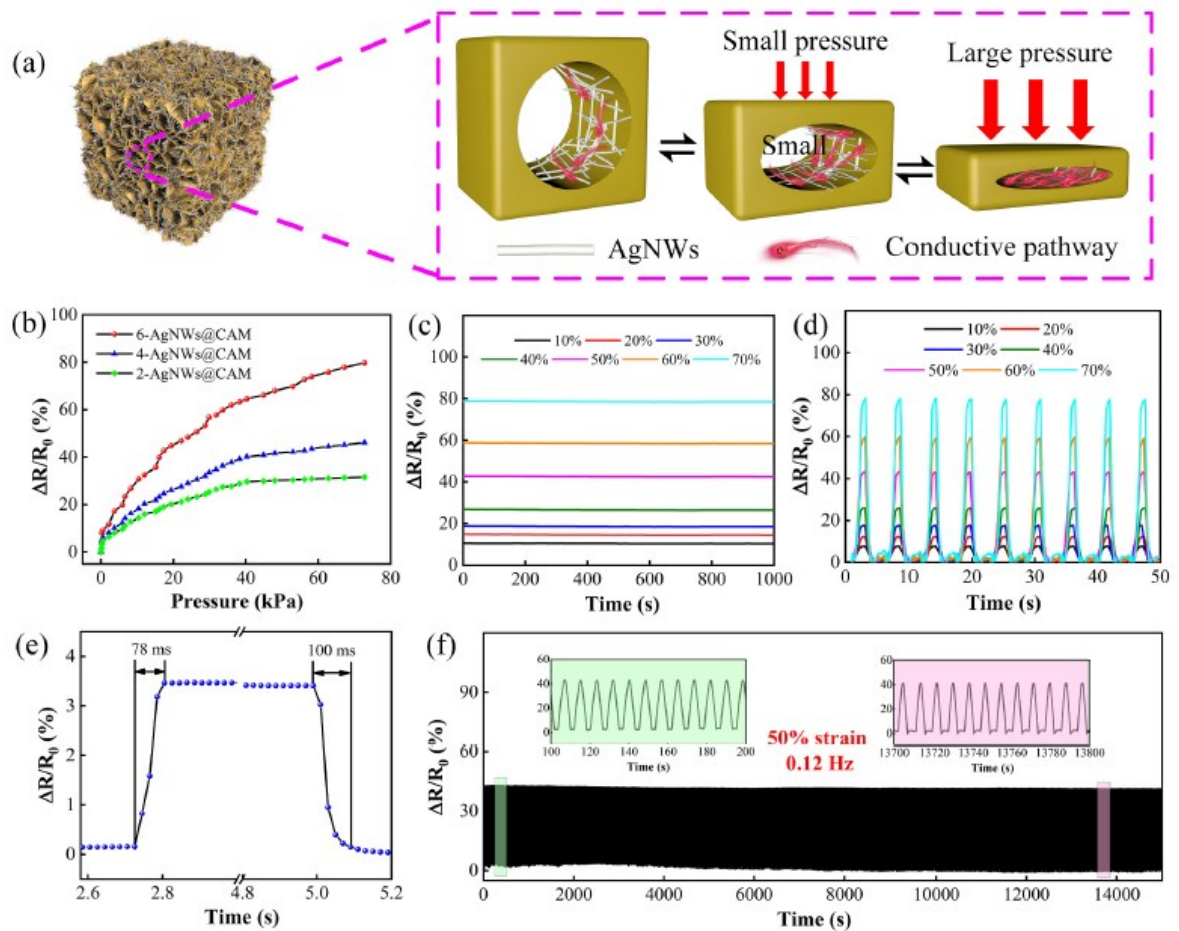
Figura 14 – Curvas RRC do sensor para detecção de movimentos mínimos, incluindo (a) vibração da trilha sonora, (b) deglutição, (c) respiração nasal e (d) batimento cardíaco.



Fonte: (Chen et al., 2024)

Sua estrutura porosa, com poros entre 200 e 500 μm , é o que permite a detecção de pressão: a variação dos pontos de contato entre os nanofios durante a compressão. Os resultados são: sensibilidade de $1,90 \text{ kPa}^{-1}$ (na faixa de 0 a 30 kPa (Ver Figura 15(b))), um tempo de resposta de apenas 78 ms mostrado na Figura 15(e) e estabilidade comprovada por 1800 ciclos (Ver Figura 15(f)). A combinação desses materiais ainda trouxe vantagens: propriedades de retardância à chama (LOI de 64,1%) e super-hidrofobicidade, com um ângulo de contato de 154° (Ver Figura 15(a)). As aplicações? Vão do monitoramento de movimentos articulares amplos à detecção de micromovimentos, como respiração, deglutição e pulso, conforme a Figura 15 (a, b e d) tenta exemplificar (Chen et al., 2024).

Figura 15 –Sensor de pressão piezoresistivo



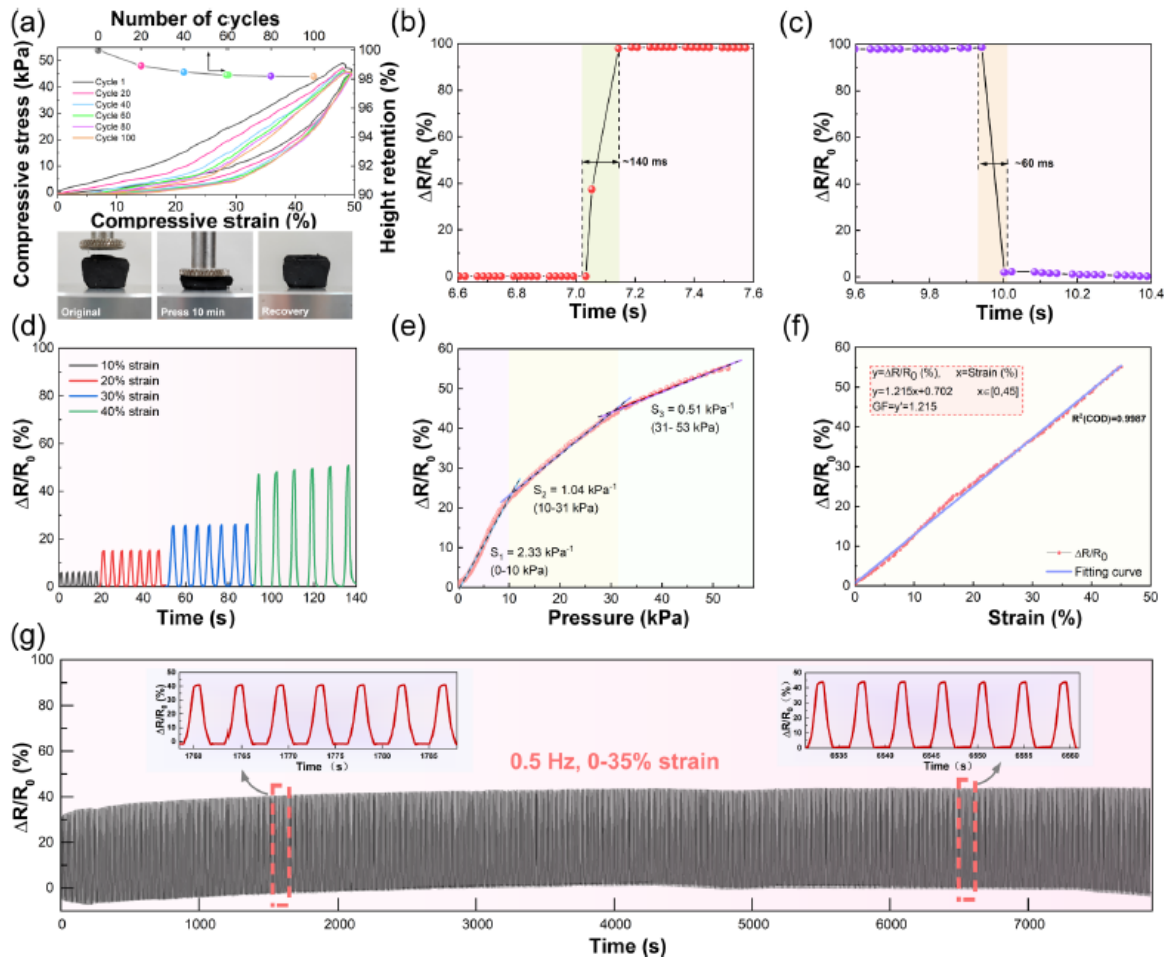
Fonte: (Chen et al., 2024)

Em uma abordagem distinta, um sensor piezoresistivo flexível foi desenvolvido a partir de um aerogel de carboximetilquitosana/lignossulfonato de sódio (CCS/LS). Sua composição são materiais biodegradáveis e uma rede condutora dual de C-CNTs e MXene (Lu et al., 2024). Esse aerogel, obtido por Congelamento-secagem direcional radial, exibiu uma densidade de $43,1 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ e uma recuperação impressionante, superior a 98,2% após 100 ciclos que é mostrado na Figura 16(a).

Em termos de desempenho, o dispositivo alcançou uma sensibilidade de $2,33 \text{ kPa}^{-1}$ (na faixa de 0–10 kPa (Ver Figura 16(e))), um tempo de resposta de 140 ms (Ver Figura 16(b)) e estabilidade comprovada por 2000 ciclos (Ver Figura 16(g)). As aplicações desse dispositivo são amplas: desde a detecção de movimentos corporais e pulso arterial até microexpressões faciais e reconhecimento de fala, com uma similaridade de 93,9%. Um ponto crucial, e que merece destaque, é a degradabilidade do material em HCl 1 M em 70 h, com a possibilidade de recuperar os elementos

condutores por centrifugação. Isso configura uma abordagem promissora para sensores de alto desempenho, sim, mas com um impacto ambiental significativamente menor. Um avanço para a sustentabilidade na eletrônica flexível (Lu et al., 2024).

Figura 16 – Curvas de tensão-deformação à compressão e processo de compressão-recuperação do aerogel C-CNTs/MXene/CCS/LS



Fonte: (Lu et al., 2024)

Desenvolveu-se um sensor piezoresistivo flexível verdadeiramente inovador, cuja arquitetura engenhosa se manifesta em uma estrutura sanduíche multicamadas com microdomos intertravados. Este design integra filmes de PDMS/CNT e membranas de nanofibras de TPU/MXene, ambos fabricados por eletrofiação (Wang et al., 2024).

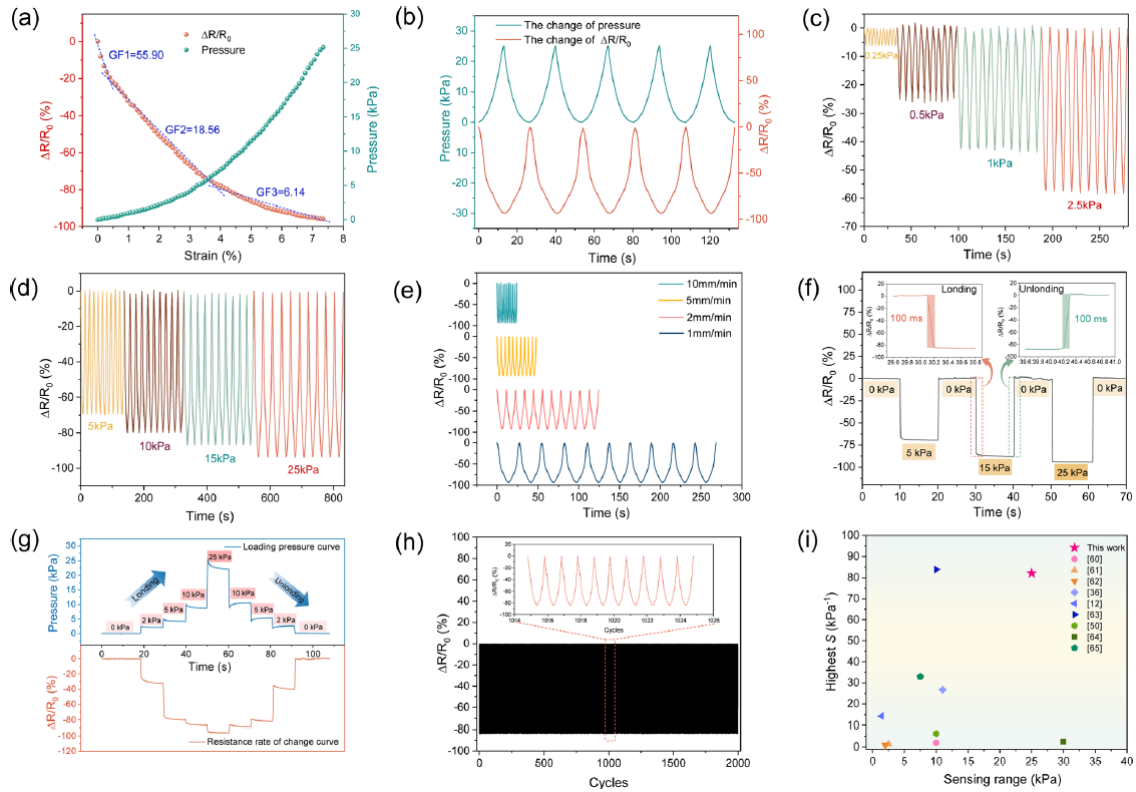
O desempenho notável deste sensor, reside em sua configuração intertravada, que estabelece múltiplos mecanismos piezoresistivos de forma sinérgica. Isso inclui resistências de contato, de rede condutora e de tunelamento,

como detalhado na Figura 17. Consequentemente, o sensor exibe uma sensibilidade impressionante de $82,17 \text{ kPa}^{-1}$ na faixa de 0 a 25 kPa (Figura 17(d)), um tempo de resposta ágil de 100 ms (Figura 17(f)) e uma estabilidade que supera 2000 ciclos (Figura 17(h)).

As aplicações potenciais são vastas, sem dúvida. O dispositivo foi testado com êxito no monitoramento de movimentos corporais, como deglutição, caminhada e flexão dos dedos. Além disso, demonstrou um potencial promissor para o reconhecimento de gestos ao ser integrado em uma luva instrumentada (Wang et al., 2024).

A configuração "*interlocking*", ou intertravada, descreve um arranjo onde componentes, partes ou camadas se encaixam, entrelaçam ou conectam de maneira mútua e segura. Essa interconexão gera uma estrutura mais robusta e estável, onde a interação entre as partes é essencial para o desempenho do sistema. No contexto de materiais e engenharia, como neste sensor, uma configuração intertravada significa que as superfícies ou estruturas dos componentes se engrenam ou se fixam umas nas outras, em vez de simplesmente se sobrepor. Isso pode ampliar a área de contato efetiva, otimizar a transferência de força ou sinal, e criar múltiplos pontos de interação que contribuem para propriedades desejadas, como a piezoresistividade.

Figura 17 – Caracterização do desempenho mecano-elétrico do sensor de pressão C3-TM1.



Fonte: (Wang et al., 2024)

Foi desenvolvido por *Han et al., 2021* desenvolveram um hidrogel nanocompósito piezoresistivo que se destaca por sua sustentabilidade ambiental e elevada estabilidade. A inovação reside na sua composição: nanopartículas híbridas de lignina-prata (Lig-Ag NPs) incorporadas em uma matriz de álcool polivinílico (PVA). O grande objetivo? Superar, de uma só vez, as limitações mecânicas e os desafios de estabilidade da condutividade elétrica.

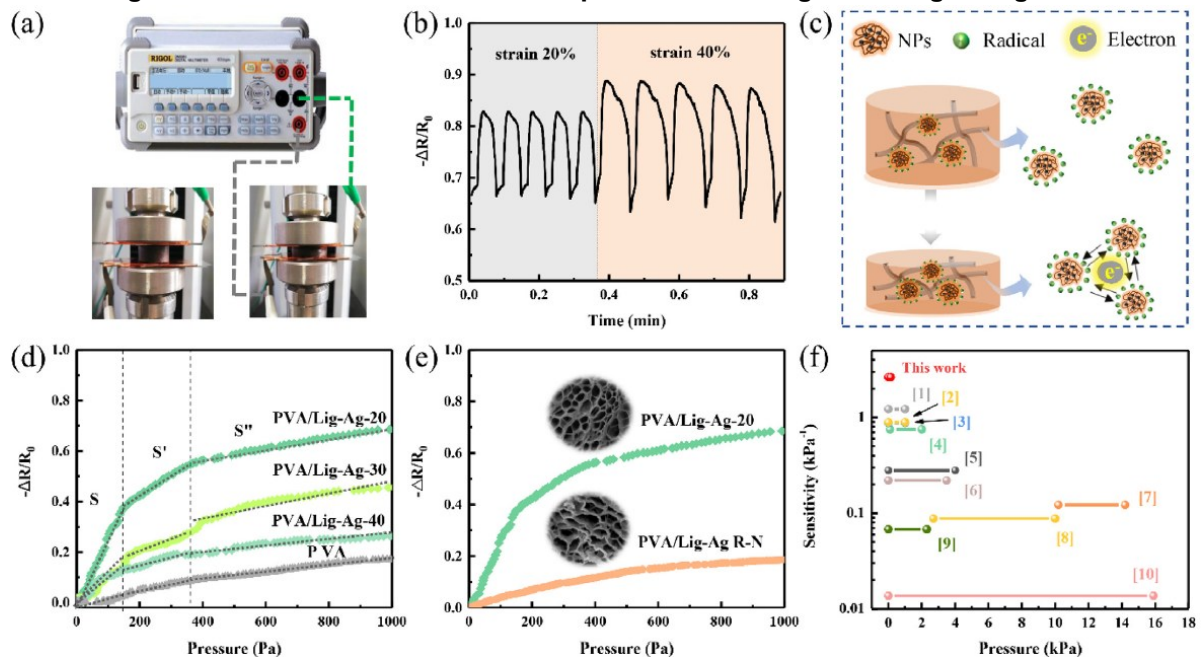
A síntese das Lig-Ag NPs ocorreu por nanoprecipitação em meio alcalino. Nesse processo, os grupos fenólicos e metoxila da lignina alcalina atuaram como agentes redutores, transformando íons Ag^+ em nanopartículas metálicas. Um detalhe crucial é a geração de radicais semiquinona estáveis, que otimizam a transferência eletrônica.

O desempenho mecânico do hidrogel PVA/Lig-Ag-20 conforme mostrado na Figura 18(d) superou significativamente o do PVA puro. Sua resistência à tração atingiu 0,79 MPa (um aumento de 8 vezes), o módulo de Young alcançou 2,26 kPa (6 vezes mais), e a tenacidade chegou a $1,04 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ (10 vezes superior). Também

demonstrou uma elevada resistência à fadiga, mantendo-se estável após 100 ciclos de compressão a 40% de deformação (ver Figura 18(b)), sem qualquer perda mensurável de tensão.

No que tange à resposta piezoresistiva, o material alcançou uma sensibilidade notável de $S = 2,630 \text{ kPa}^{-1}$ (ver Figura 18(f)). Esse valor é 2,8 vezes superior ao do PVA puro (ver Figura 18(f)) e se mostra altamente competitivo frente aos sensores já descritos na literatura.

Figura 18 – Testes de sensibilidade à pressão do hidrogel PVA/Lignin-Ag.

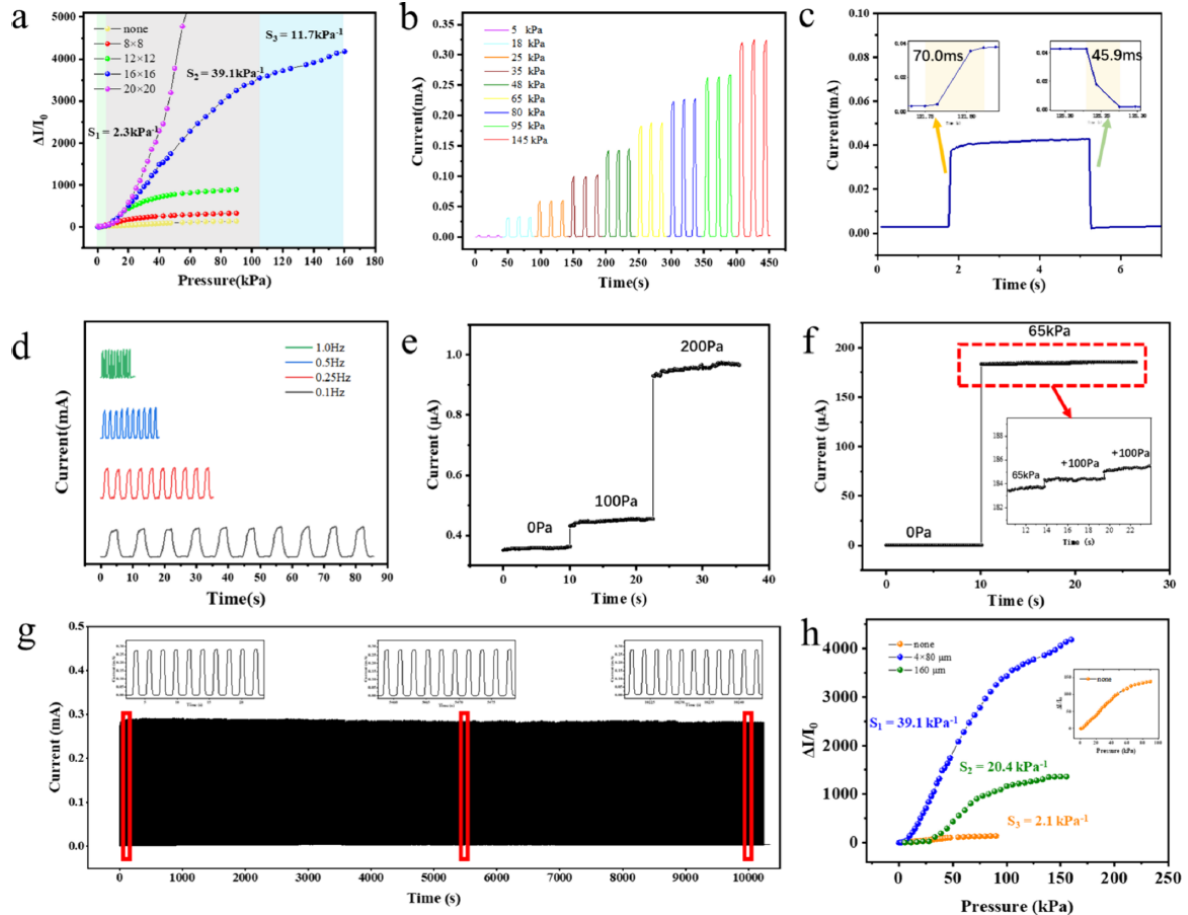


Fonte: (Han et al., 2021)

Desenvolveu-se um sensor de pressão piezoresistivo flexível em arquitetura sanduíche, integrando uma camada sensível de MXene/PDMS com microestrutura espinhosa hierárquica e um espaçador de microesferas de PMMA ($\sim 80 \mu\text{m}$) organizado em padrão 16×16 sobre eletrodos interdigitados de CNTs (Huang et al., 2024). O espaçador diminui o contato inicial entre a camada sensível e os eletrodos e redistribui o estresse mecânico; a análise por elementos finitos confirma esse efeito. Como resultado, conforme mostrado na Figura 19(a) o dispositivo alcança sensibilidade de $39,1 \text{ kPa}^{-1}$ e linearidade de $R^2 = 0,99$ entre 7,5 e 105,0 kPa (ver Figura 19(h)), detectando pressões de 100 Pa a 160,0 kPa (ver Figura 19(e)) com precisão de 0,63 % da escala total. Os tempos de resposta e recuperação são,

respectivamente, 70,0 ms e 45,9 ms, e o sensor mantém desempenho por mais de 5000 ciclos (ver Figura 19(g)). Aplicou-se o sensor ao monitoramento de movimentos musculares, articulares e da garganta durante a fala; conectado a uma rede neural artificial totalmente conectada, o sistema reconheceu cinco palavras com 96,0 % de acurácia.

Figura 19 – Caracterização do sensor de pressão flexível

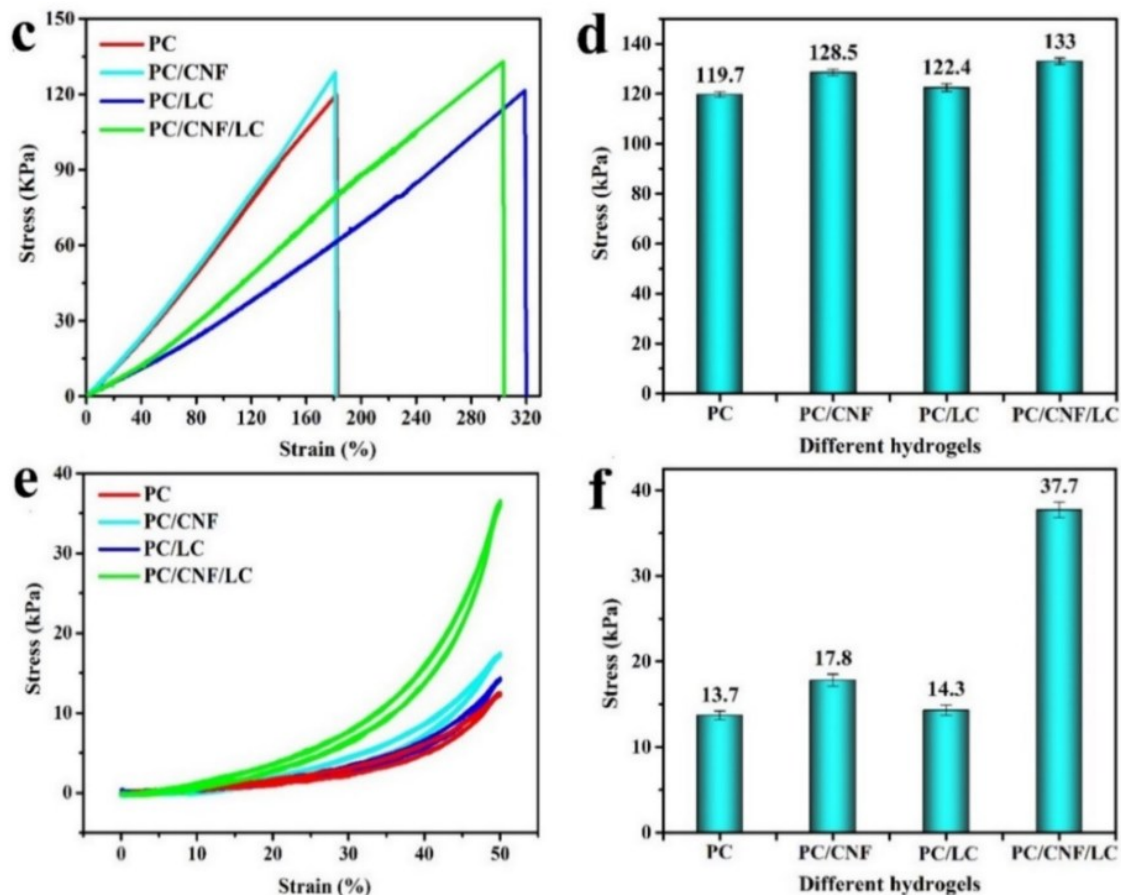


Fonte: (Huang et al., 2024)

Em (Li et al., 2021b), a equipe de pesquisa detalha a criação de um hidrogel condutor flexível (PC/CNF/LC). Este material inovador combina álcool polivinílico (PVA), quitosana carboximetilada (CMC), nanofibrilas de celulose (CNF) e carbono derivado de lignina (LC), este último atuando como uma carga condutora sustentável. Para obter o LC, a lignina passou por um processo de carbonização com KOH a 800 °C, enquanto as CNF foram produzidas a partir da fibrilação mecânica de polpa de bagaço de cana-de-açúcar.

Os testes revelaram propriedades mecânicas notáveis: uma tensão de tração na ruptura de 133 kPa (ver Figura 20(c e d)), representando um aumento de 11,1% em comparação com o PC puro, e uma tensão de compressão de 37,7 kPa (ver Figura 20(c e d)). O hidrogel demonstrou ainda uma excelente capacidade de recuperação após 33% de deformação por estiramento e manteve sua estabilidade por mais de 10 ciclos de compressão/tração, com pouca histerese (ver Figura 20(e f)). O material também exibiu estabilidade térmica, com sua principal degradação ocorrendo por volta dos 325 °C, um evento majoritariamente ligado ao PVA. O comportamento elétrico do hidrogel mostrou-se sensível à deformação, evidenciado pela variação da resistência relativa ($\Delta R/R_0$) sob estiramento e pressão (0–40 kPa).

Figura 20 – Exibição das propriedades mecânicas do hidrogel PC/CNF/LC, incluindo alongamento (a) e compressão (b), (c) 10 curvas contínuas de carga-descarga cíclica de tração e (d) tensão correspondente dos hidrogéis, (e) 10 curvas contínuas de carga-descarga cíclica de compressão e (f) tensão correspondente dos hidrogéis.

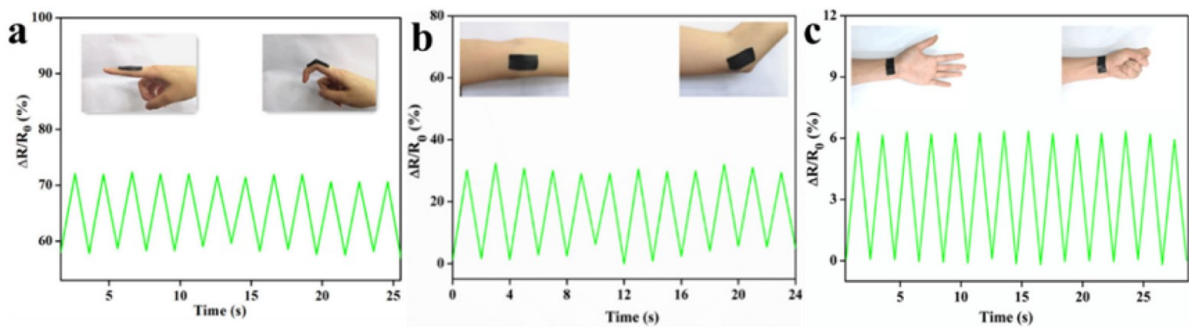


Fonte: (Li et al., 2021b)

Como resultado, o dispositivo pôde ser aplicado no monitoramento de movimentos humanos, como a flexão de um dedo, a flexão do cotovelo e a preensão

palmar, conforme ilustrado na Figura 21(a, b e c). A robustez estrutural, sem dúvida, deriva do reticulamento por ligações de hidrogênio entre os grupos OH, NH₂ e COOH, o que posiciona este hidrogel como uma alternativa ecológica e promissora para sensores piezorresistivos vestíveis.

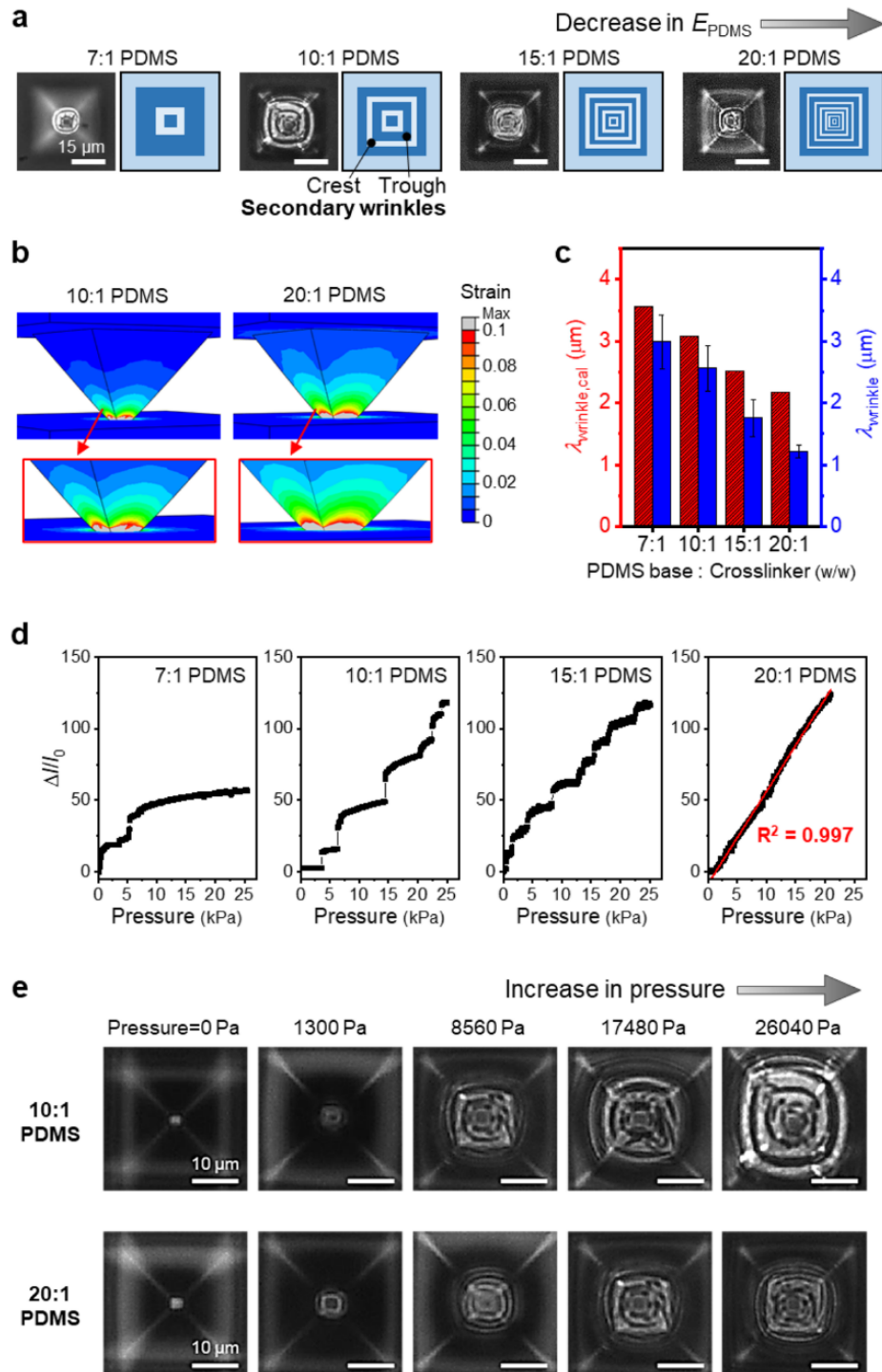
Figura 21 – Hidrogel condutor flexível (PC/CNF/LC): (a) Flexão dos dedos, (b) flexão da articulação do cotovelo, (c) preensão palmar.



Fonte: (Li et al., 2021b)

Um sensor de pressão piezorresistivo com sensibilidade linear foi fabricado por rota simples e escalável, utilizando filmes finos de ouro nanocraqueados (NC-GF) depositados em substratos de PDMS com geometrias piramidal e plana, empregados como eletrodos (Kim et al., 2024). A estratégia explora o descompasso entre os módulos de Young do ouro e do elastômero (Ver Figura 22(b)), promovendo a formação de rugas secundárias sob pressão, as quais atuam como protuberâncias hierárquicas e favorecem contatos contínuos entre os eletrodos conforme indicado na Figura 22(a/e). O dispositivo exibiu sensibilidade linear de 4,2 kPa⁻¹ em ampla faixa de pressão (até 25 kPa; R² = 0,997) conforme mostrado na Figura 22(d), limite de detecção ultrabaixo de 0,5 Pa, tempo de resposta de 150 ms e elevada durabilidade. O desempenho foi preservado após 100 ciclos de alongamento a 30% de deformação e 2000 ciclos de pressão, atributo associado às nanocraqueladuras radiais, que dissipam tensões mecânicas e reduzem a ocorrência de fraturas irreversíveis. As aplicações demonstradas incluem monitoramento vestível de pulso e sistemas de interação humano-robô, com acionamento preciso de mão robótica em função da resposta linear à pressão, sem necessidade de circuitos complexos.

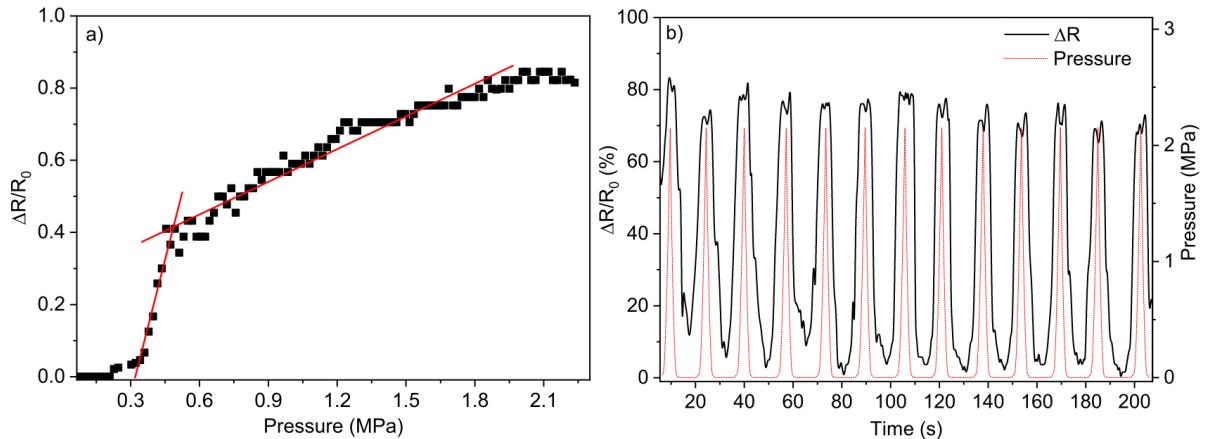
Figura 22 – (a) Imagens de microscopia óptica (MO) e esquemas correspondentes mostrando as morfologias do NC-GF no PDMS com estrutura piramidal com diferentes densidades de reticulação (base de PDMS: reticulante, m/m) sob carga de pressão de 25 kPa. (b) Resultados de MEF mostrando a distribuição de deformação na estrutura piramidal com diferentes densidades de reticulação do PDMS. (c) $\lambda_{\text{wrinkle, cal}}$ e λ_{wrinkle} na estrutura piramidal variando com a densidade de reticulação do PDMS sob carga de pressão de 25 kPa. (d) Curvas de resposta à pressão para os sensores de pressão variando com a densidade de reticulação do PDMS. (e) Imagens de MO mostrando as topografias da superfície do PDMS com estrutura piramidal 10:1 e 20:1 variando com as pressões aplicadas.



Fonte: (Kim et al., 2024)

Recentemente, *MACHADO, 2024* estudou a resposta dos sensor de pressão produzido com PET/SWCNTs/PANI/PET. Conforme mostrado na Figura 23(a) o sensor responde adequadamente até a pressão de 2,1 MPa, após este valor o sensor estabiliza e deixa de responder.

Figura 23 – Gráficos: a) $\Delta R/R_0$ versus pressão, as linhas vermelhas sólidas são ajustes lineares usados para estimar o parâmetro S e b) resposta do sensor operando em ciclos sob pressão variável de 0 a 2,1 MPa.



Fonte: (MACHADO, 2024)

Diante desse panorama, evidencia-se a viabilidade do desenvolvimento de sensores de pressão baseados em polímeros e nanoestruturas, conforme discutido no Capítulo 1. Nesta dissertação, investigam-se sensores de pressão à base de blendas PANI:lignina e SWCNTs, visando à operação em faixas de pressão da ordem de MPa, com ajuste da faixa operacional por meio do percentual de lignina em relação à PANI. A lignina é um polímero com maior módulo de Young, e portanto, pode contribuir para o aumento da faixa de operação do sensor. Na sequência, são descritos os objetivos, materiais, os métodos e as técnicas de processamento e caracterização empregados neste trabalho.

3 EXPERIMENTAL (MATERIAIS E MÉTODOS)

3.1 Materiais

Polietilenotereftalato recoberto com óxido de Índio e Estanho (PET/ITO, 40 ohm/□) foi adquirido da empresa Zhuhai-Kaivo, tinta condutora composta de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNTs), etanol absoluto, n-metilpirrolidona (NMP), ácido clorídrico (HCl, 37%), zinco metálico em pó foram adquiridos da empresa Sigma-Aldrich®.

Os compósitos PANI:Lignina foram sintetizados de acordo com a referência (Rodrigues et al., 2001), no Laboratório LAPOE (DAQBi-UTFPR-CT) coordenado pela prof. Paula C. Rodrigues, com o percentual de lignina em relação de PANI de 0, 3, 5 e 10 %.

3.2 Preparo das soluções

3.2.1 Preparação das soluções PANI:Lignina (rede)

Para o preparo das soluções, aproximadamente 20 mg do compósito PANI:lignina (rede) foram dissolvidos em 0,5 mL de N-metil-2-pirrolidona (NMP), resultando em concentração de 4% (m/v). Inicialmente, o NMP foi transferido para um vial de 4 mL e mantido sob agitação magnética, à temperatura ambiente. Em seguida, o compósito PANI:lignina foi adicionado em pequenas alíquotas, procedimento adotado para minimizar a formação de precipitados. Após a completa incorporação da fase sólida, obteve-se uma solução homogênea, de coloração azul-escura, como é possível ver na Figura 24, característica da PANI em seu estado isolante.

Figura 24 – Amostra de PANI:Lignina (Rede) aplicada diretamente em lâmina de vidro



Fonte: Autor (2026)

3.2.2 Preparação de solução de SWCNTs.

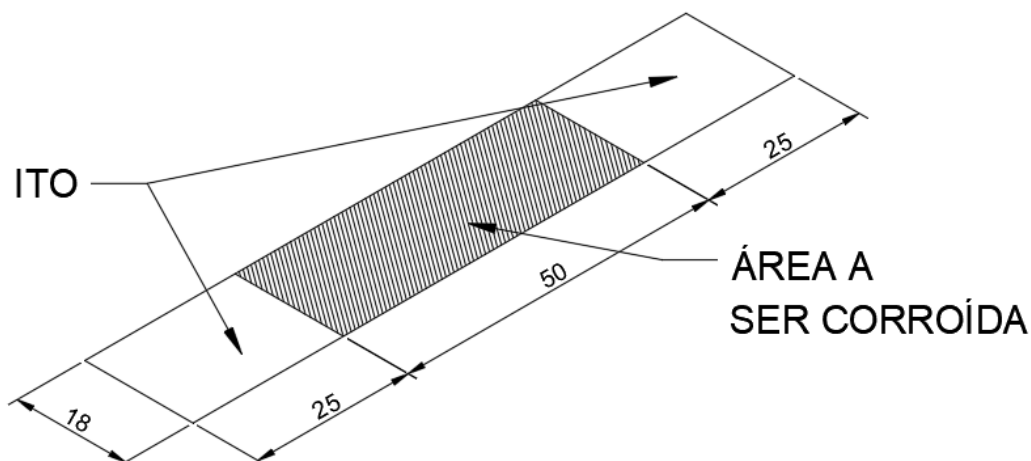
Para o preparo da dispersão, transferiram-se duas espátulas de tinta condutora de SWCNTs para um vial de 4 mL. A fim de viabilizar o processamento em filmes finos por spin coating ou blade coating, adicionaram-se 100 μL de NMP e 30 μL de etanol absoluto, seguido de agitação mecânica por 5 min.

3.3 Técnicas de processamento

3.3.1 Preparação dos substratos PET/ITO

Os sensores foram confeccionados em dois tamanhos distintos: $1,8 \times 10$ cm e $2,5 \times 6$ cm. Os padrões dos eletrodos de ITO foram definidos e delimitados com o auxílio de fita adesiva, sendo posteriormente submetidos ao processo de corrosão química em solução aquosa de HCl (1:2, v/v) e zinco em pó, seguido de lavagem com água destilada. Na sequência, os substratos foram secos com jatos de ar comprimido ou com papel absorvente. A Figura 25 apresenta um diagrama esquemático indicando as regiões preservadas com ITO e as regiões corroídas.

Figura 25 – Geometria do sensor (Corrosão - Versão 1)

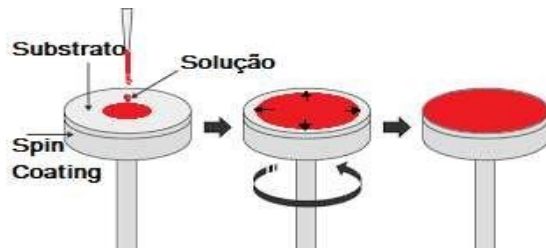


Fonte: Autor (2026)

3.3.2 Produção dos filmes de SWCNTs

Os filmes de SWCNTs foram processados na região central do sensor por meio das técnicas de *spin coating* ou *blade coating*. O processo de *spin coating* consiste, fundamentalmente, na deposição de uma gota da dispersão sobre o substrato, que é então submetido à rotação em alta velocidade (Figura 26). A força centrífuga promove o espalhamento radial do líquido, do centro para as bordas do substrato, com expulsão do excesso de solução e início do afinamento progressivo do filme. Paralelamente, o cisalhamento do ar gerado pela rotação contribui para a redução adicional da espessura nas etapas finais do processo, quando o filme se aproxima de sua configuração final (Wu, 2006). Do ponto de vista físico, a espessura final da camada depositada resulta do balanço entre a força centrífuga, responsável pelo escoamento radial, e as forças viscosas, que se opõem a esse escoamento. Dessa interação obtém-se um filme homogêneo e contínuo de SWCNTs sobre o substrato PET/ITO (Popov, 2004). Para a produção dos filmes de SWCNTs, utilizou-se um equipamento da Apex Instruments (modelo EZspin-A1), disponível no laboratório NANOTEC-NEO (Figura 27), operando a 7000 rpm por 30 s.

Figura 26 – Imagem ilustrativa referente à técnica spin coating



Fonte: (MACHADO, 2024)

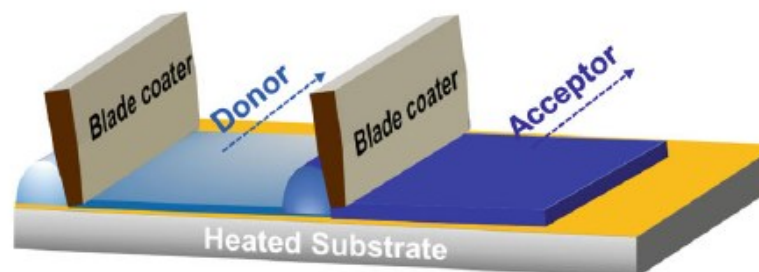
Figura 27 – Spin coating da Apex Instruments



Fonte: (Apex Instruments Co, 2016)

Os filmes de SWCNTs podem ser fabricados pela técnica de *blade coating*, que é um método para depositar filmes finos e uniformes de soluções, pastas ou tintas sobre substratos, utilizando uma lâmina (*doctor blade knife coating*) para espalhar o material (Diao et al., 2014). O processo é simples: deposita-se uma pequena quantidade de solução sobre um substrato aquecido (Kondo et al., 2019). Em seguida, um aplicador, a "*blade*", desliza linearmente sobre essa solução, espalhando-a em uma camada fina e uniforme por toda a superfície, como ilustrado na Figura 28 (Polisen, 2013). Finalmente, o filme recebe um tratamento térmico para consolidar sua formação (Kondo et al., 2019). Essencialmente, trata-se de um revestimento por raspagem, onde a espessura do filme é precisamente controlada pela altura do aplicador em relação ao substrato, pela velocidade de deslocamento da blade e pela concentração da solução (Gu et al., 2018).

Figura 28 – Processo Blade Coating



Fonte: (Zhang et al., 2021b)

Para a deposição dos filmes por *blade coating*, foi utilizado o equipamento AutoCoat, modelo BCC-02, conforme mostrado na Figura 29(a e c)). Neste caso foi

utilizada a lâmina LC01, mostrada na Figura 29(b), que se mostrou mais eficiente, devido ao material ser mais viscoso.

Figura 29 – Blade Coater BCC-02, lâmina do tipo LC01 e mecanismo de ajuste de altura

a)



b)



c)



Fonte: Autor (2026)

Para depositar os SWCNTs, definimos parâmetros operacionais específicos: uma velocidade de avanço de 30 mm/s, a placa de fixação a 60 °C, uma distância entre a lâmina e o substrato de 0,25 mm e, claro, a lâmina LC01. Ajustamos essa distância com micrômetros, garantindo a precisão. Em seguida, os filmes de SWCNTs passaram por um tratamento térmico de 30 minutos a 80 °C.

3.3.3 Produção dos filmes de PANI:Lignina (rede)

Os filmes de PANI:Lignina (rede) foram depositados sobre substratos PET/ITO/SWCNTs por meio da técnica de *blade coating*. Os parâmetros de processamento foram ajustados para velocidade de deposição de 1 mm·s⁻¹, temperatura do substrato de 90 °C, distância *blade*–substrato de 0,45 mm e utilização de lâmina do tipo LW01, mostrada na Figura 30. A lâmina em questão se apresentou com melhor espalhamento por conta da sua área de contato apresentar perfil do tipo

cunha. Anteriormente tentou-se fazer o espalhamento com a lâmina LC01, mostrado na Figura 29(b), porém não apresentou resultado satisfatório.

Figura 30 – Lâmina LW01 (Autocoat)



Fonte: Autor (2026)

Na sequência, as amostras PET/ITO/SWCNTs/PANI:Lignina(rede) foram tratadas termicamente a 80 °C durante 30 minutos.

3.3.4 Processo de Dopagem da Polianilina

A polianilina é um polímero condutor cuja condutividade elétrica pode ser modulada de forma reversível por meio do processo de dopagem, mostrado na Tabela 1, que consiste, essencialmente, na exposição do material a meios ácidos ou básicos (Wilson et al., 2007). Neste trabalho, a dopagem do filme PANI:Lignina (rede) foi realizada em capela de exaustão, por exposição ao vapor de HCl durante 5 s.

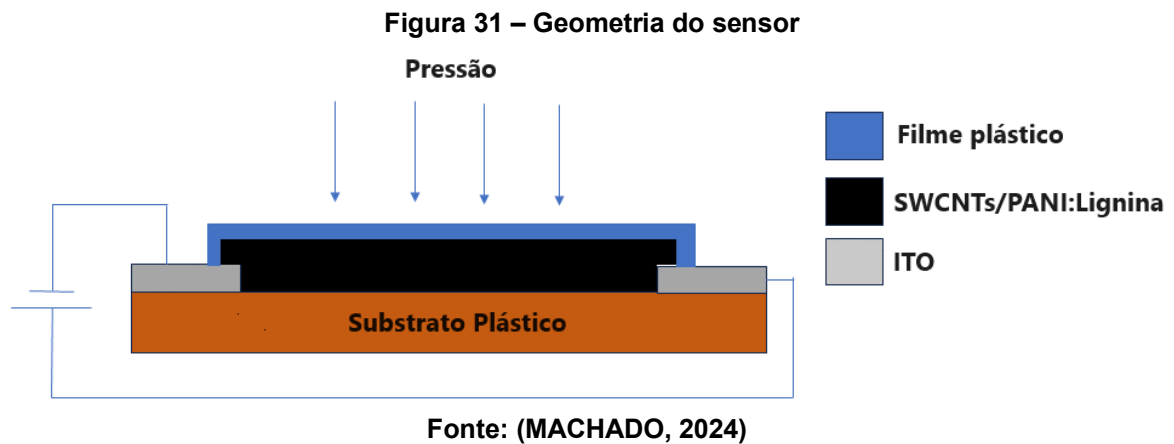
Tabela 1 - Dopagem - Resumo do Mecanismo

Etapa	Descrição
Material base	PANI na forma base esmeraldina (isolante)
Agente dopante	HCl (ácido clorídrico — dopagem por protonação)
Mecanismo	Protonação dos nitrogênios amina → formação de polarons
Produto	Sal de esmeraldina (condutor)
Evidência experimental	Mudança de cor + espectros FTIR, Raman e UV-Vis
Aplicação	Eletrodo condutor em sensor piezoresistivo de pressão

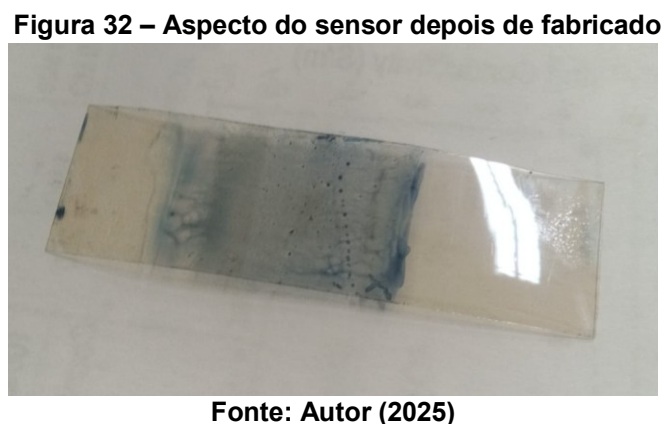
Fonte: (MACHADO, 2024)

A Figura 31 apresenta a configuração final das camadas que compõem o sensor. Na etapa final de fabricação, o dispositivo foi encapsulado com fita de polieterimida (PEI), com o objetivo de aumentar a resistência mecânica e evitar danos à camada sensora durante a aplicação de pressão. Esse encapsulamento reduz o

risco de remoção da camada ativa de SWCNT/PANI:lignina durante os ensaios mecânicos.



A Figura 32 mostra o aspecto do sensor depois da etapa de dopagem, e é possível verificar o tom esmeraldino.



3.4 Técnicas de caracterização

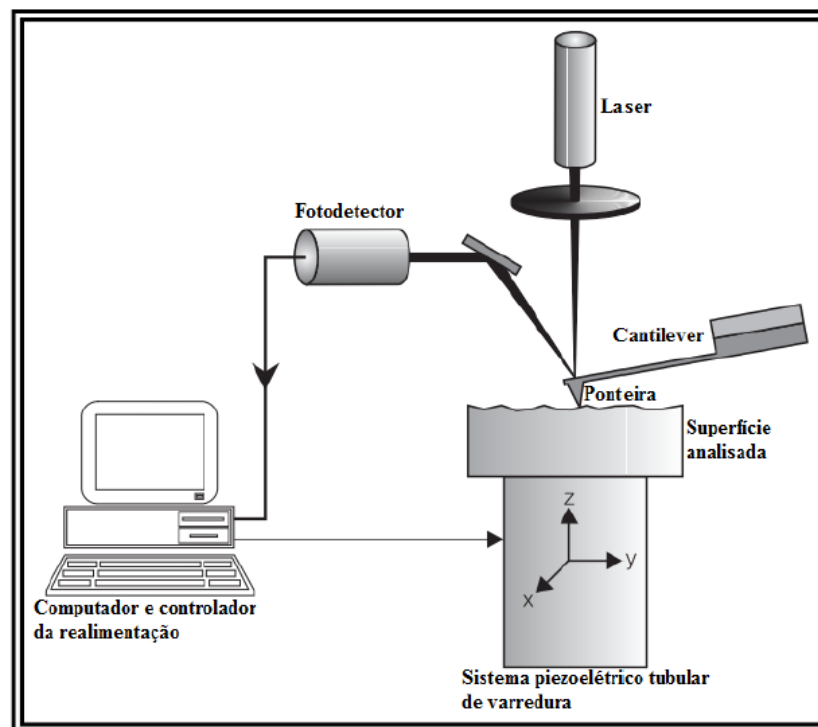
3.4.1 Microscopia de força atômica

A Microscopia de Força Atômica (AFM) é uma ferramenta poderosa para explorar superfícies, revelando detalhes nanométricos da morfologia de polímeros (Senna; Menezes; Botaro, 2012). Criada por Binnig, Quate e Gerber em 1986 (Binnig; Quate; Gerber, 1986), ela faz parte da família das microscopias de varredura por sonda (SPM). O funcionamento é engenhoso: um microcantilever, com uma ponteira ultrafina, varre a amostra. As interações atômicas entre a ponteira e a superfície causam deflexões no cantilever, que são precisamente medidas. Isso permite a

obtenção de imagens topográficas com uma grande resolução vertical, e a técnica também pode ser usada em condições de atmosfera controlada, ambiente aberto ou até mesmo em líquidos (Cascudo et al., 2018).

Nos equipamentos disponíveis no mercado, o método mais comum para detectar essas deflexões é a reflexão de um feixe laser, geralmente um laser de 650 nm e 5 mW. Esse feixe atinge a parte refletora do cantilever e é direcionado para um fotodiodo segmentado. Quando o cantilever se move, o ângulo do feixe refletido muda, e essa alteração é convertida em uma imagem tridimensional da superfície. A sonda se move nos eixos x, y e z, controlada por atuadores piezoelétricos que conseguem realizar movimentos minúsculos, de décimos de ângström a centenas de micrômetros. A Figura 33 ilustra o esquema de funcionamento da técnica. Esta técnica revolucionou a caracterização de materiais (Cascudo et al., 2018).

Figura 33 – Setup experimental de um AFM



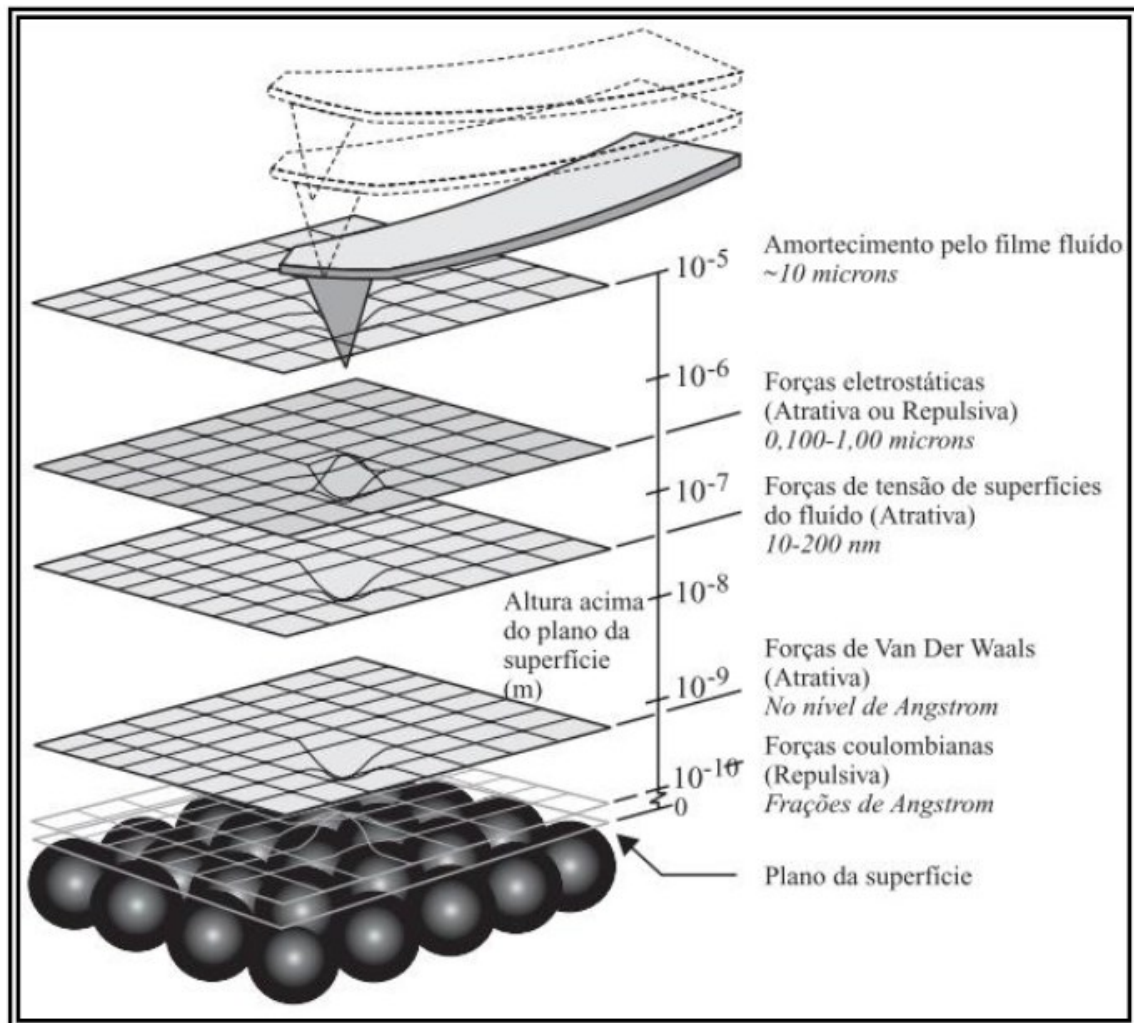
Fonte: (Cascudo et al., 2018)

3.4.1.1 Modos de Operação

As forças envolvidas na interação entre a ponteira e a amostra variam em função da distância de separação entre ambas, princípio que fundamenta os três modos principais de operação da microscopia de força atômica (French et al., 2010). Essa

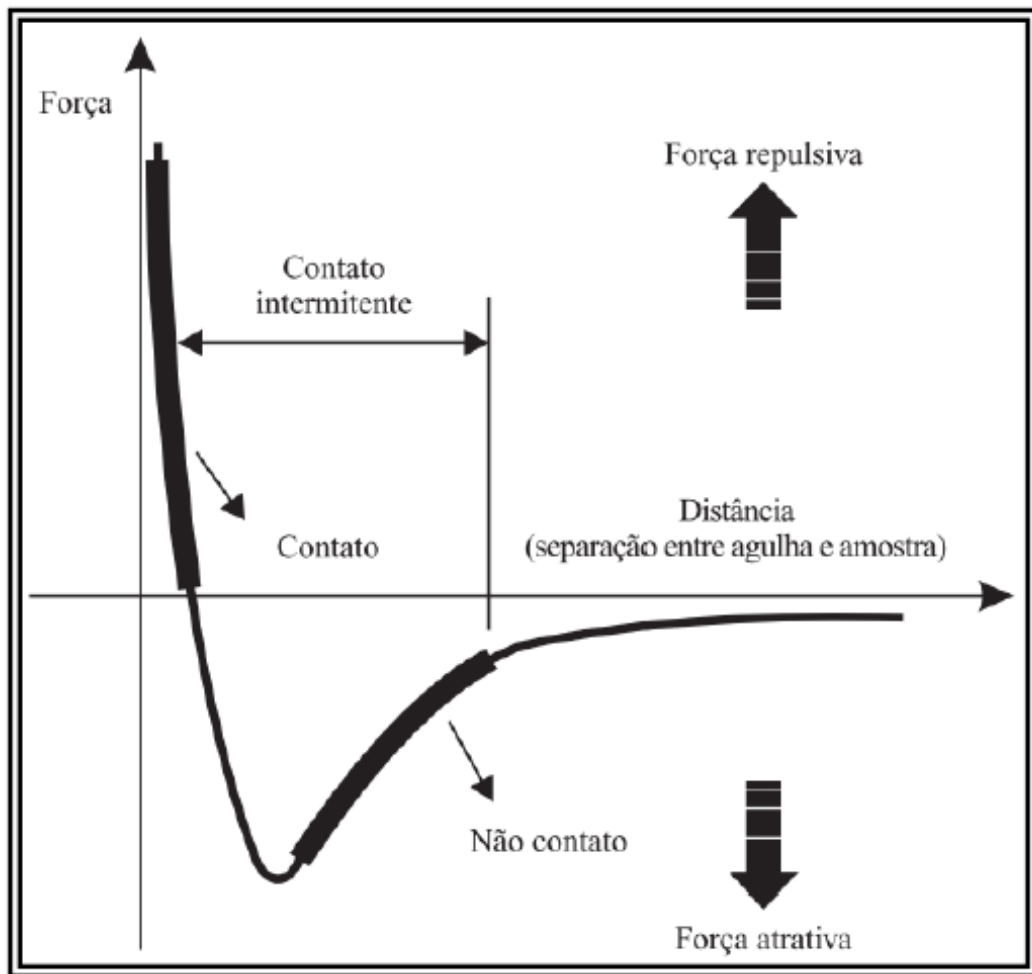
dependência é ilustrada esquematicamente na Figura 34 e descrita quantitativamente pela curva força–distância apresentada na Figura 35.

Figura 34 – Relação de forças que atuam entre a ponteira e a amostra em função da distância que as separa



Fonte: (Cascudo et al., 2018)

Figura 35 – Curva de força versus distância de separação ponta-amostra



Fonte: (Cascudo et al., 2018)

Para dois corpos eletricamente neutros separados por dezenas de nanômetros, predominam forças atrativas de Van der Waals. À medida que a distância se reduz para a faixa de alguns ângströms, passam a predominar forças repulsivas de origem coulombiana (Wallace, 2012). Essa transição fundamenta os principais modos de operação da AFM:

3.4.1.1.1 Modo Contato

A ponteira varre a superfície mantendo distância mínima, na faixa interatômica. Nesse regime, predominam forças repulsivas da ordem de 10^{-6} a 10^{-9} N. Requer cuidado em amostras frágeis, pois forças laterais podem causar deformações superficiais (Rana; Pota; Petersen, 2017)

3.4.1.1.2 Modo Não Contato

A ponteira oscila a aproximadamente 10 a 100 nm da superfície, interagindo com forças de longo alcance (Van der Waals, eletrostáticas e de dipolo magnético), tipicamente da ordem de 10^{-12} N. O cantilever vibra próximo à frequência de ressonância (f_0), e variações nessa frequência são utilizadas para mapear a topografia da superfície. Esse modo é frequentemente adotado na análise de materiais com elevada dureza e rugosidade, a fim de evitar danos à ponteira (Rana; Pota; Petersen, 2017)

3.4.1.1.3 Modo Contato Intermitente (*Tapping Mode*):

O cantilever vibra com amplitude entre 20 e 100 nm e toca a superfície de forma periódica, com frequência da ordem de 50.000 a 500.000 Hz. Esse modo minimiza forças laterais deletérias, sendo particularmente adequado para amostras macias, como polímeros e materiais biológicos. Além disso, permite aquisição de imagem de fase, fornecendo informações sobre heterogeneidades mecânicas, como diferenças no módulo de elasticidade entre fases (Rana; Pota; Petersen, 2017).

Nesta dissertação, as análises de morfologia e de módulo de Young foram realizadas em microscópio SPM-9700HT (Shimadzu), operando em modo contato, com ponta de raio nominal de 10 nm, constante elástica de 0,2 N/m e frequência de ressonância em torno de 13 kHz. As curvas força–distância e o mapeamento do módulo de Young foram obtidos por meio do módulo NanoMapping 3D, utilizando ponta recoberta com filme Au–Cr (raio nominal de 35 nm; revestimento de 30 nm de Au e 20 nm de Cr; constante elástica de 0,18 N/m; frequência de 13 kHz).

3.4.1.2 Cálculo do Módulo de Young a Partir da Curva de Força

3.4.1.2.1 Modelo Derjaguin-Muller-Toporov (DMT)

O modelo DMT, conforme a equação (3.1), é uma ferramenta essencial para analisar curvas de força-indentação. Sua aplicação é ideal quando as forças de adesão são significativas, mas a deformação da ponta e da amostra, decorrente dessa adesão, é mínima. A equação (3.1) detalha o cálculo da força de carga (F_L) em função da profundidade de indentação (i) (Dokukin; Sokolov, 2012).

$$F_L(i) = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} i^{3/2} + F_{pull-off} \quad (3.1)$$

Onde:

- F_L é a força de carga.
- E^* é o módulo de Young reduzido, calculado como $E^* = E/(1 - \nu^2)$, onde E é o módulo de Young da amostra e ν é o coeficiente de Poisson.
- R^* é o raio reduzido, dado por $1/R^* = 1/R_{\text{indenter}} + 1/R_{\text{surface}}$. Para uma superfície plana, R^* é igual ao raio da ponta do indentador.
- i é a profundidade de indentação.
- $F_{\text{pull-off}}$ é a força de "pull-off", que representa a força de adesão no ponto de separação da ponta da amostra.

Para calcular o módulo de Young, o módulo elástico DMT é derivado das partes de descarga das curvas de força, utilizando esta equação (Dokukin; Sokolov, 2012).

3.4.1.2.2 Modelo Johnson-Kendall-Roberts (JKR)

O modelo JKR é mais apropriado para materiais macios onde as forças de adesão são significativas e causam deformação na ponta e na amostra antes mesmo do contato mecânico. Ao contrário do DMT, o JKR não possui uma solução explícita para $F_L(i)$, mostrado na equação (3.2) e (3.3) sendo necessário um ajuste paramétrico. As equações paramétricas utilizadas são (Dokukin; Sokolov, 2012):

$$i(a) = \frac{a^2}{R^*} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2\pi a \omega_{\text{adh}}}{E^*}} \quad (3.2)$$

$$F_L(a) = \frac{4}{3} E^* \frac{a^3}{R^*} - \sqrt{8\pi a^3 E^* \omega_{\text{adh}}} \quad (3.3)$$

Onde:

- a é o raio de contato.
- ω_{adh} é a energia de adesão (por unidade de área) da interação entre a ponta do AFM e a amostra. Pode ser calculada a partir da força de pull-off, mostrada na equação (3.4):

$$\omega_{\text{adh}} = -\frac{F_{\text{pull-off}}}{2\pi R^*} \quad (3.4)$$

- As outras variáveis (E^* , R^*) têm o mesmo significado que no modelo DMT.

A escolha entre os modelos JKR e DMT é feita com base no parâmetro de Maugis α , que varia de 0 (DMT) a 1 (JKR). Para os polímeros estudados, o parâmetro de Maugis foi próximo de 1 (0.98 para JR111, 0.97 para OXP e 0.89 para poliestireno), indicando que o modelo JKR é mais apropriado para esses materiais (Dokukin; Sokolov, 2012).

As imagens de AFM foram adquiridas em modo fase no equipamento SPM-9700HT (Shimadzu), mostrado na Figura 36, utilizando ponteira NCHR (NanoWorld), com constante de força de 42 N/m e frequência de ressonância de 13 kHz, em área de varredura de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$, velocidade de varredura de 0,8 Hz e resolução de 512×512 pixels. O modo fase é sensível a variações locais de viscoelasticidade, adesão e rigidez superficial, sendo particularmente adequado para distinguir domínios com diferentes composições e graus de ordenamento em filmes de polímeros conjugados (Bhushan; Qi, 2003).

Figura 36 – Shimadzu SPM-9700HT



Fonte: (Shimadzu Corporation, 2025)

3.4.2 Perfilometria Óptica por Interferometria de Luz Branca

Para este trabalho, utilizamos o interferômetro de luz branca Talysurf CCI Lite (Taylor Hobson Ltd., Leicester, Reino Unido), modelo M12-3993-03, mostrado na Figura 37. Este instrumento opera com base na Interferometria de Correlação de Coerência (CCI), uma técnica que emprega um algoritmo proprietário para localizar, simultaneamente, o pico de coerência e a posição de fase do padrão de interferência. Tudo isso é gerado por uma fonte de luz com largura de banda selecionável (TAYLOR HOBSON, 2008). É um método que confere ao sistema uma resolução impressionante e alta sensibilidade ao sinal óptico que retorna da superfície. Isso permite medições em modo único para superfícies polidas, rugosas, especulares ou de espalhamento difuso, sem a necessidade de reconfigurar o equipamento entre amostras (TAYLOR HOBSON, 2005).

As especificações técnicas do Talysurf CCI Lite são: resolução vertical máxima de 0,01 nm (0,1 Å), um piso de ruído inferior a 0,08 nm (0,8 Å) e uma repetibilidade RMS da superfície abaixo de 0,02 nm (0,2 Å). A faixa de varredura vertical (eixo Z) é de 2,2 mm, mas pode ser expandida para mais de 10 mm com a técnica de *stitching* axial (Şek, 2020). Já a área máxima de medição atinge 6,6 mm nos eixos X e Y, e pode ser ampliada para mais de 75 mm com stitching lateral. A resolução óptica lateral varia entre 0,4 e 0,6 µm, dependendo das características da superfície analisada (TAYLOR HOBSON, 2005). O equipamento é compatível com uma vasta gama de superfícies, com refletividade entre 0,3% e 100%, incluindo materiais como metais, vidros, polímeros, fotorresistes, tintas líquidas e pastas (TAYLOR HOBSON, 2005, 2008).

O sistema conta com objetivas interferométricas intercambiáveis de 5 vezes, 20 vezes e 50 vezes (Xu et al., 2021), que correspondem a aumentos nominais de 50 vezes, 200 vezes e 500 vezes, respectivamente. Entre os recursos analíticos disponíveis, encontramos: avaliação de rugosidade 2D e 3D, medição de altura de degrau, análise fractal, razão de material (curva de Abbott–Firestone), análise espectral e autocorrelação superficial (TAYLOR HOBSON, 2005). Os dados foram processados no software MountainsMap® (Digital Surf, Besançon, França), uma ferramenta robusta que permite o cálculo de mais de 120 parâmetros em 2D e 40 parâmetros em 3D, tudo em conformidade com as ISO 4287 (International Standard,

1997) e ISO 25178-2 (International Standard, 2021), com referência adicional em (Digital Surf, 2026).

Figura 37 – Interferômetro de Luz Branca (Taylor Hobson, modelo Talysurf CCI Lite M12-3993-03)



Fonte: (UTFPR, 2026)

O sistema de medição por interferometria de luz branca (WLI), também conhecido como interferometria de varredura de coerência (CSI) (Gianto et al., 2018), permite medir sem contato uma série de características. Ele avalia parâmetros de rugosidade bidimensionais (perfil) e tridimensionais (topografia superficial), determina a espessura de camadas transparentes (Gianto et al., 2018) e quantifica alterações morfológicas causadas por desgaste, corrosão, usinagem ou tratamentos superficiais (Altamar-Mercado; Patiño-Vanegas; Marrugo, 2019; Baryshev et al., 2013). A versatilidade da técnica é notável, aplicando-se a uma vasta gama de acabamentos, desde superfícies com rugosidade média R_a na casa das centenas de micrômetros até as superpolidas, com R_a inferior a 1 nm (Altamar-Mercado; Patiño-Vanegas; Marrugo, 2019).

Seu princípio de funcionamento consiste em um divisor de feixe, localizado dentro do objetiva interferométrica (com configurações Michelson, Mirau ou Linnik, conforme a ampliação) que divide o feixe luminoso em dois caminhos ópticos distintos.

Um desses caminhos é direcionado à superfície da amostra, enquanto o outro segue para um espelho de referência. Quando os dois feixes se reencontram, formam franjas de interferência, e a intensidade I dessas franjas é descrita na equação (3.5):

$$I(z) = I_r + I_s + 2\sqrt{I_r \cdot I_s} \cdot \gamma(z) \cdot \cos\left(\frac{4\pi z}{\lambda} + \varphi_0\right) \quad (3.5)$$

Onde I_r e I_s representam as intensidades dos feixes de referência e da amostra, respectivamente. A função de coerência temporal, $\gamma(z)$ representa o envelope de visibilidade das franjas, z é a posição axial do scanner piezoelétrico, λ é o comprimento de onda central da fonte de luz e φ_0 é a diferença de fase inicial (De Groot; Deck, 1995). A altura de cada ponto da superfície é, então, determinada pela posição z onde o envelope $\gamma(z)$ atinge seu valor máximo. Esse processo é realizado computacionalmente, utilizando algoritmos de detecção de pico de coerência ou por demodulação de fase (Caber, 1993).

A resolução lateral do sistema, limitada pelo critério de Rayleigh, depende diretamente da objetiva em uso (Abdelsalam; Yao, 2017). O equipamento oferece objetivas de 5 vezes, 20 vezes e 50 vezes, que proporcionam aumentos nominais de 50 vezes, 200 vezes e 500 vezes, respectivamente. As resoluções laterais típicas para essas objetivas são de aproximadamente 3,5 μm , 0,9 μm e 0,4 μm . Já a resolução vertical, um dos principais benefícios da técnica, é geralmente inferior a 1 nm para superfícies com boa refletividade, superando significativamente a perfilometria de contato convencional (*stylus*).

A captura da imagem topográfica é feita digitalmente por um sensor CCD ou CMOS acoplado ao tubo, enquanto o estágio piezoelétrico a varre em passos nanométricos. O resultado é uma matriz bruta de alturas que mapeia a topografia completa, podendo gerar milhões de pontos de dados por aquisição, dependendo da resolução do detector e da objetiva.

Os dados das medições podem ser exportados em formato bruto (não filtrado), como arquivos .sur, .csv ou outros compatíveis com o padrão ISO 25178-71 (Todhunter et al., 2017), para análise externa. Alternativamente, os dados podem ser processados diretamente no software MountainsMap® (Digital Surf, Besançon, França) (Digital Surf, 2026). Este software é bastante completo, permitindo aplicar filtros de forma (como remoção de inclinação e curvatura por polinômios de menor

grau), filtros de ondulação e rugosidade conforme a norma ISO 16610 (He et al., 2021), nivelamento de perfil pelo método dos mínimos quadrados, e calcular parâmetros normalizados de rugosidade. Isso inclui os parâmetros de perfil 2D (como Ra, Rq, Rz, Rsk, Rku) da ISO 4287 (International Standard, 1997), os parâmetros de superfície 3D (como Sa, Sq, Sz, Ssk, Sku, Sal, Str, Smr) da ISO 25178 (International Standard, 2013), e os parâmetros funcionais derivados da curva de Abbott-Firestone, como Sk, Spk e Svk (International Standard, 1996). A curva de Abbott-Firestone, também conhecida como curva de distribuição de material (BAC, Bearing Area Curve), é obtida pela integral da função de distribuição de probabilidade das alturas e oferece informações cruciais sobre o comportamento funcional da superfície em aplicações tribológicas (Borodich; Pepelyshev; Savencu, 2016).

Neste trabalho, filmes de PANI ou PANI:Lignina foram preparados sobre superfície de vidro. Um degrau entre o substrato e a superfície do filme foi criado com fita Kapton durante o processo de deposição por *blade coating*. As imagens foram adquiridas com lente de 20 vezes; posteriormente, os filmes foram caracterizados em termos de espessura e rugosidade superficial utilizando o software MountainsMap®.

3.4.3 Caracterização eletromecânica dos sensores de pressão

A resposta do sensor de pressão foi monitorada pela mudança na resistência elétrica (R) quando comparada com a resistência elétrica inicial (R₀) sob aplicação de pressão na faixa de 0 a 12 MPa. Os valores de resistência elétrica foram monitorados utilizando um controlador Arduino acoplado em um circuito elétrico com divisor de tensão. Os valores da resistência do sensor (R₁) são calculados a partir dos valores conhecidos das tensões de entrada e saída e de uma resistência de referência (R₂), conforme a equação (3.6):

$$V_{saida} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} V_{entrada} \quad (3.6)$$

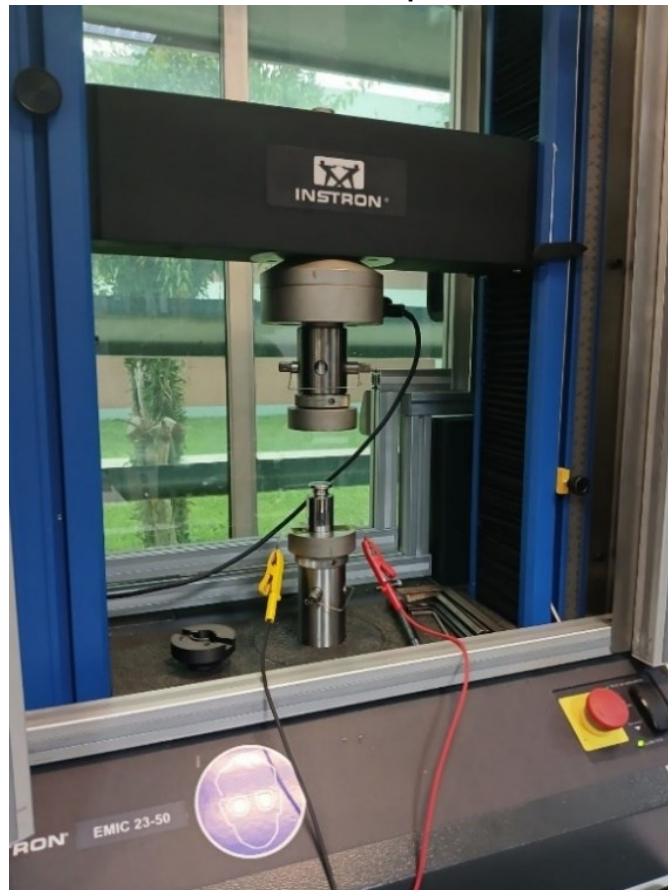
A resistência de referência deve estar na mesma ordem da resistência do sensor (Li et al., 2021a), para manter esta condição foram utilizados potenciostatos de escala variável de 10-30 kΩ.

A pressão controlada foi aplicada utilizando um equipamento de testes da marca Instron modelo EMIC 23-50, disponível na empresa Robert Bosch Ltda em Curitiba, mostrados na Figura 38. A sensibilidade (S) do sensor foi calculada a partir

da Equação (3.7) e foram realizadas medições em ciclos para avaliar a reprodutibilidade e a estabilidade operacional do sensor.

$$S = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta P} \quad (3.7)$$

Figura 38 – Teste de sensor em Máquina Universal de ensaios



Fonte: Autor (2026)

3.4.3.1 INSTRON 23-50 (Máquina universal de ensaios)

O INSTRON 23-50, mostrado na Figura 39 é uma máquina universal de ensaios eletromecânica de dupla coluna; que impressiona pela sua capacidade de carga de 50 kN. Ela foi desenvolvida para uma gama variada de testes, desde materiais poliméricos e borrachas de alto desempenho até molas, condutores elétricos e até mesmo materiais médicos e odontológicos, entregando um desempenho robusto tanto em tração quanto em compressão. Suas velocidades de ensaio são notavelmente flexíveis, variando de 0,005 mm/min a 500 mm/min, com um retorno rápido de 600

mm/min após o ensaio e um curso máximo de 1.122 mm. Em termos de dimensões, o equipamento mede 1.582 mm de altura, 756 mm de largura e 707 mm de profundidade, com um espaçamento entre colunas de 420 mm. Pesando 121 kg e operando com uma potência máxima de 600 VA (INSTRON, 2015).

Figura 39 – Máquina Universal de Ensaios INSTRON EMIC 23-50



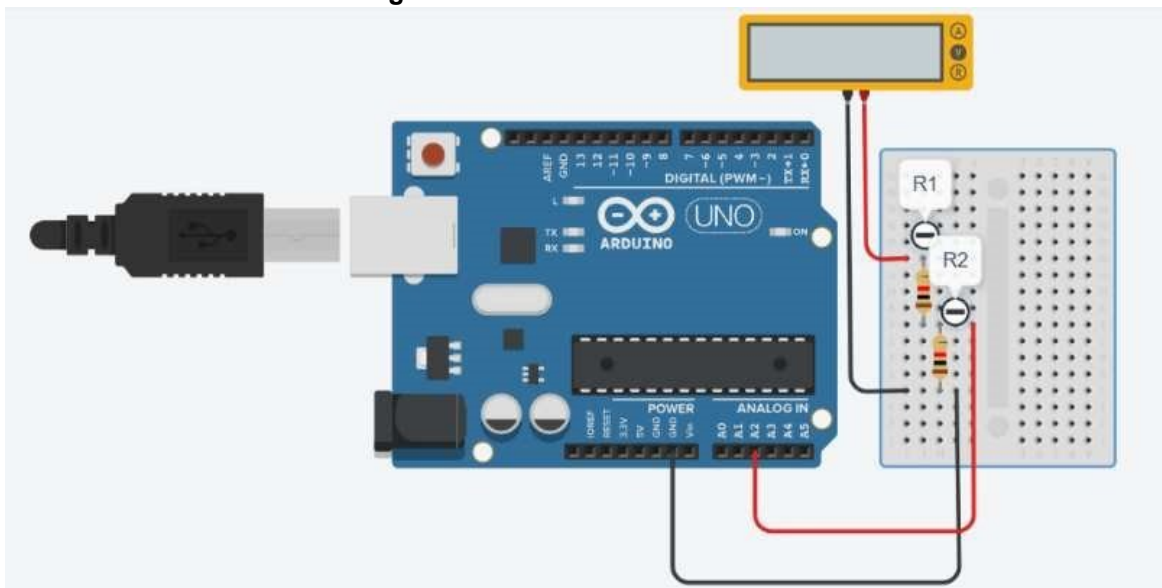
Fonte: (INSTRON, 2015)

Os testes foram realizados nos laboratórios de engenharia de materiais da empresa Robert Bosch do Brasil, localizada em Curitiba – PR.

3.4.3.2 Placa Arduino® UNO R3

Foi utilizada a placa Arduino® UNO R3, conforme mostrada na Figura 40 para as medições de resistência elétrica. Essa plataforma de desenvolvimento, amplamente adotada, integra o microcontrolador ATmega328P, que opera a até 16 MHz e dispõe de 32 kB de memória Flash, 2 kB de SRAM e 1 kB de EEPROM. O coprocessador ATmega16U2 gerencia a comunicação USB. A placa oferece 14 pinos digitais de entrada/saída, 6 entradas analógicas, 6 canais PWM e interfaces SPI e I2C. A alimentação e programação ocorrem via conector USB tipo B, com suporte a tensões de entrada de 6 V a 20 V pelo jack de alimentação (Creative Commons, 2026).

Figura 40 – Placa Arduino® Uno R3



Fonte: (MACHADO, 2024)

4 RESULTADOS

4.1 Análises de Microscopia de Força Atômica (AFM)

4.1.1 Análise Morfológica e Fase

As imagens de topografia e de fase do filme de PANI puro mostradas na Figura 41 revelam uma superfície granular predominantemente uniforme, algo característico de filmes de polianilina feitos por deposição direta via blade coating. O contraste de fase observado, por sua vez, indica que existem regiões com diferentes respostas viscoelásticas. Isso sugere a presença de domínios mais organizados, onde as cadeias de PANI se empilham, misturados com áreas mais amorfas (De Souza Gomes, 2012). Essa microestrutura bifásica é crucial para como o filme transporta carga: a condução elétrica na PANI ocorre preferencialmente ao longo de domínios mais ordenados e interconectados, que formam caminhos percolativos contínuos (Sapurina; Shishov, 2012). A continuidade e a densidade desses caminhos serão o fator central para interpretar as diferenças de resposta piezorresistiva observadas entre as composições, como será discutido na seção 4.3.

A incorporação de 3% de lignina na matriz de PANI mostrada na Figura 41(b) produz modificações sutis, porém identificáveis, na morfologia superficial. As imagens de fase revelam uma distribuição mais uniforme dos domínios poliméricos em comparação ao filme puro, o que pode ser atribuído ao papel compatibilizante da lignina. Esse biopolímero, por sua natureza anfifílica e pela presença de grupos funcionais reativos como hidroxilas fenólicas e alifáticas, estabelece interações com as cadeias de PANI por meio de ligações de hidrogênio e interações de transferência de carga, favorecendo a dispersão homogênea dos componentes (Seo et al., 2019). Nessa concentração, não se observa segregação de fases pronunciada, e a textura morfológica permanece coerente com a do filme puro, indicando que a lignina foi incorporada de forma compatível à matriz condutora. Contudo, como será discutido nas seções seguintes, essa homogeneização morfológica tem implicações contraditórias: ao mesmo tempo em que planariza o filme e reduz sua espessura média de aproximadamente 200 nm para 47 nm, conforme quantificado pela perfilometria óptica, a introdução de lignina como fase isolante dilui a densidade de

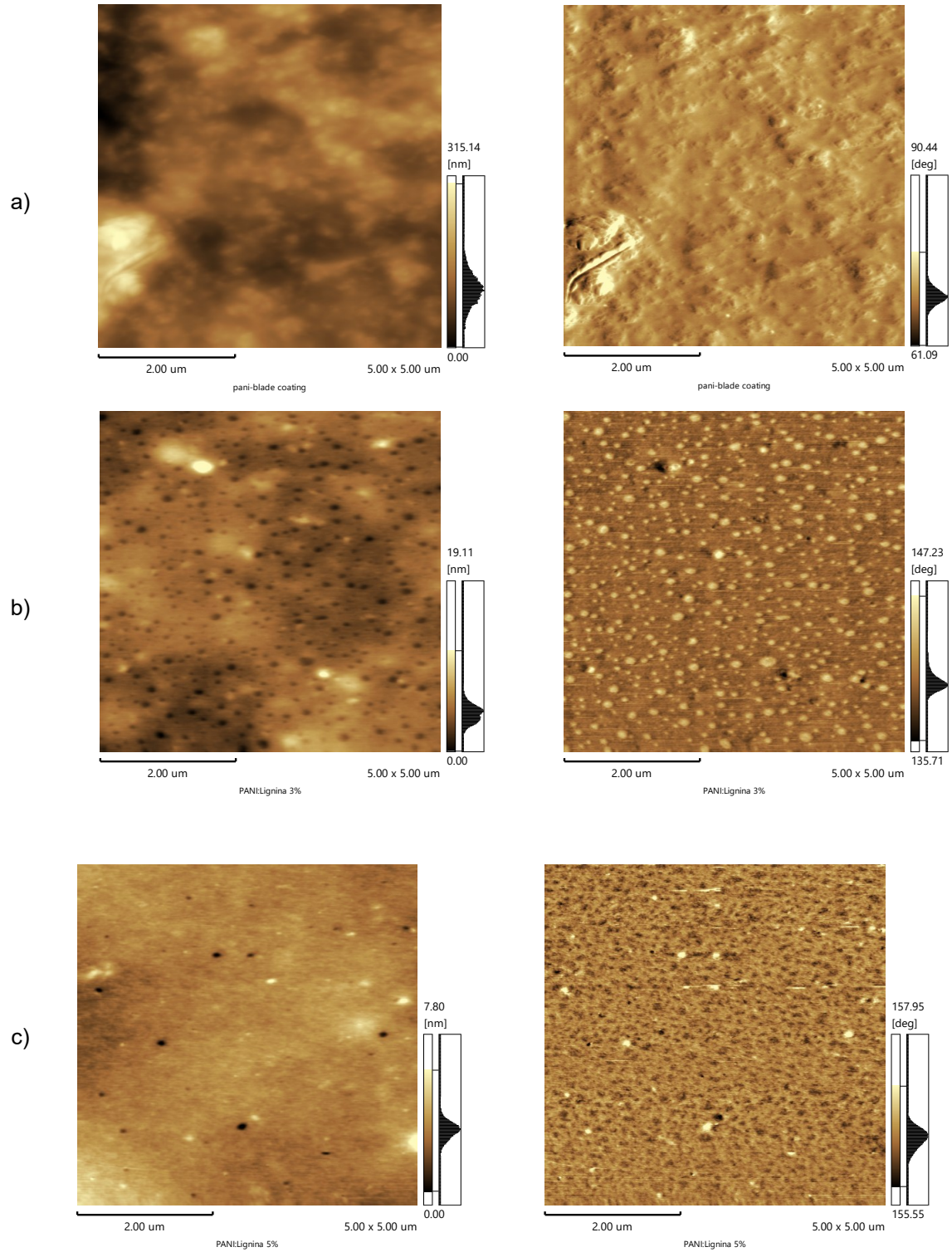
contatos entre cadeias condutoras de PANI, reduzindo a eficiência percolativa da rede.

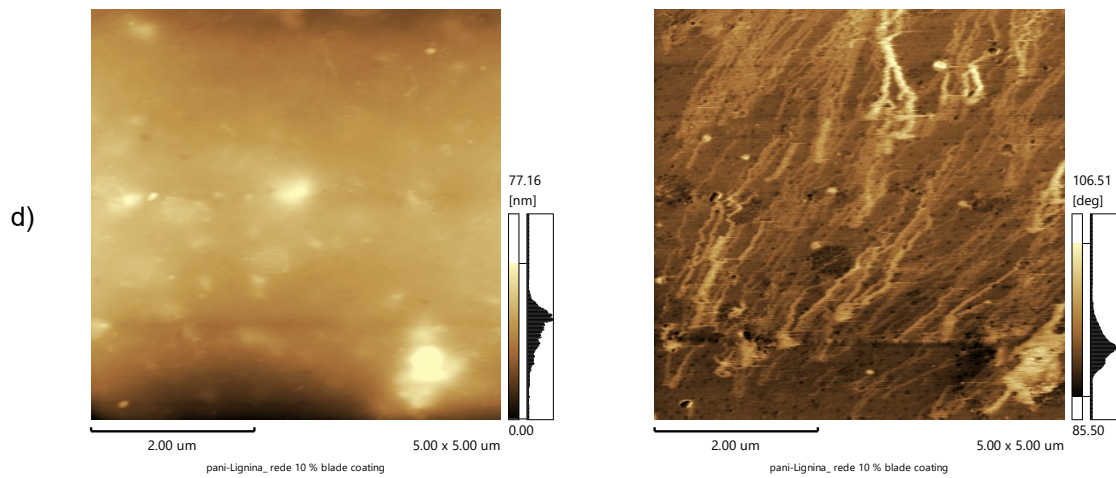
Com 5% de lignina, na Figura 41(c), o contraste de fase torna-se visivelmente mais pronunciado, sinalizando o início de uma heterogeneidade morfológica mais acentuada. Há a formação de domínios de maior escala lateral, compatíveis com o início de separação de fases parcial entre regiões ricas em PANI e regiões de maior concentração de lignina. Esse fenômeno é recorrente em blendas poliméricas condutoras quando a fração do componente não condutor se aproxima de um limiar crítico (Taguet; Cassagnau; Lopez-Cuesta, 2014). A presença de domínios com resposta de fase distinta sugere que a lignina começa a formar regiões mais contínuas ao redor dos agregados de PANI, o que pode interferir nos caminhos de percolação elétrica. Este filme representa um ponto de transição morfológica importante no sistema estudado. Como será justificado na seção de caracterização eletromecânica, a ausência de ensaios piezorresistivos para essa concentração é sustentada pela análise morfológica: a transição observada entre 3% e 5% é gradual e não configura uma reorganização estrutural suficientemente distinta para prever comportamento piezorresistivo qualitativamente diferente do que o observado em 3%, especialmente diante da variabilidade experimental inerente às amostras de menor concentração de lignina.

O filme com maior concentração de lignina mostrado na Figura 41(d) apresenta a morfologia mais heterogênea do conjunto analisado. O contraste de fase nas imagens é significativamente mais intenso, com domínios bem definidos de tamanhos maiores distribuídos por toda a superfície, evidenciando separação de fases avançada. As estruturas em relevo mais proeminentes observadas nas imagens indicam que, nessa concentração, a lignina não se distribui de forma homogênea na matriz de PANI, formando agregados que atuam como barreiras físicas ao transporte de portadores de carga entre os domínios condutores. Do ponto de vista da eletrônica orgânica, esse nível de segregação morfológica resulta em redução da mobilidade efetiva de cargas e, conseqüentemente, da condutividade global do filme (Tsao; Müllen, 2010). No entanto, como será argumentado na seção 4.3, a heterogeneidade mecânica introduzida pela lignina nessa concentração desempenha um papel funcional relevante: ao criar domínios de módulo de Young mais elevado, redistribui gradualmente o estresse mecânico durante a compressão, ativando

progressivamente caminhos percolativos ao longo de uma faixa de pressão mais ampla.

Figura 41 – Imagens AFM a) PANI, PANI:Lignina b) 3 %, c) 5 % e d) 10 %
Topografia Fases



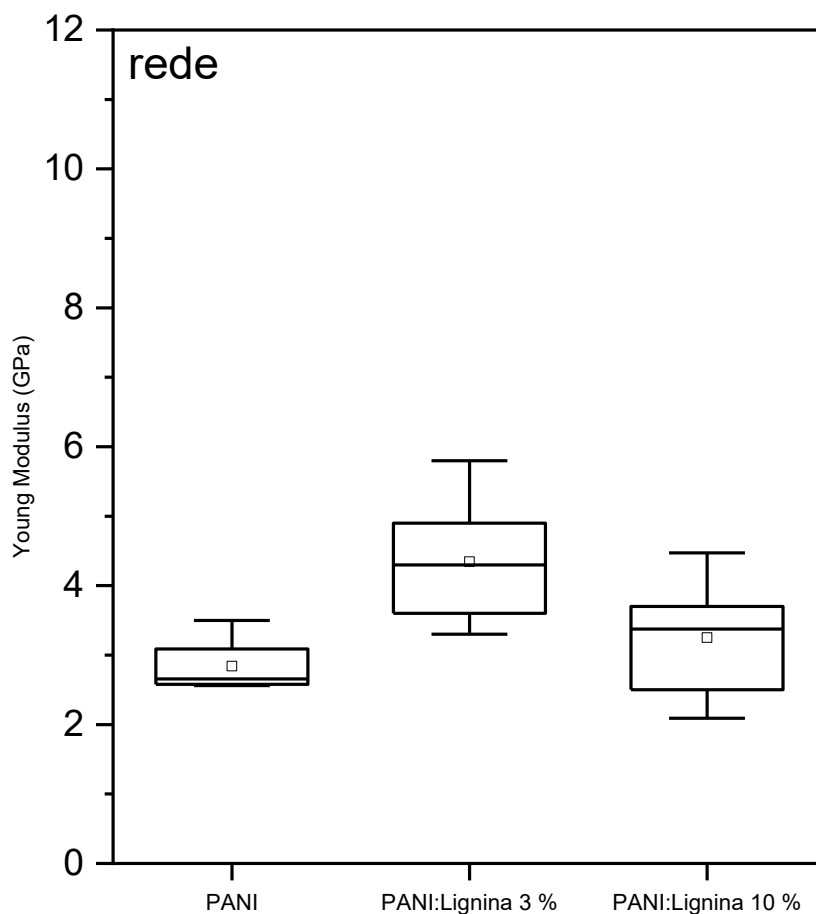


Fonte: Autor (2026)

4.1.2 Mapeamento Mecânico por AFM: Impacto da Lignina no Módulo de Young e Força de adesão

Foi realizado o mapeamento mecânico por AFM, usando o modo de força quantitativa, nos filmes de PANI pura, PANI:Lignina 3% e PANI:Lignina 10%. Esses filmes foram depositados sobre substratos de SWCNTs/PET por *blade coating*. Os resultados, conforme apresentados na Figura 42, são obtidos em três canais simultâneos: a imagem de topografia, o mapa de módulo de Young (expresso em GPa) e o mapa de força de adesão (em nN). A escala de varredura foi de $2 \times 2 \mu\text{m}^2$, uma resolução espacial que consideramos mais do que suficiente para identificar heterogeneidades mecânicas no nível nanométrico.

Figura 42 – Módulo de Young dos filmes de PANI ou PANI:Lignina (rede) depositados sobre filme de SWCNTs/PET por blade coating

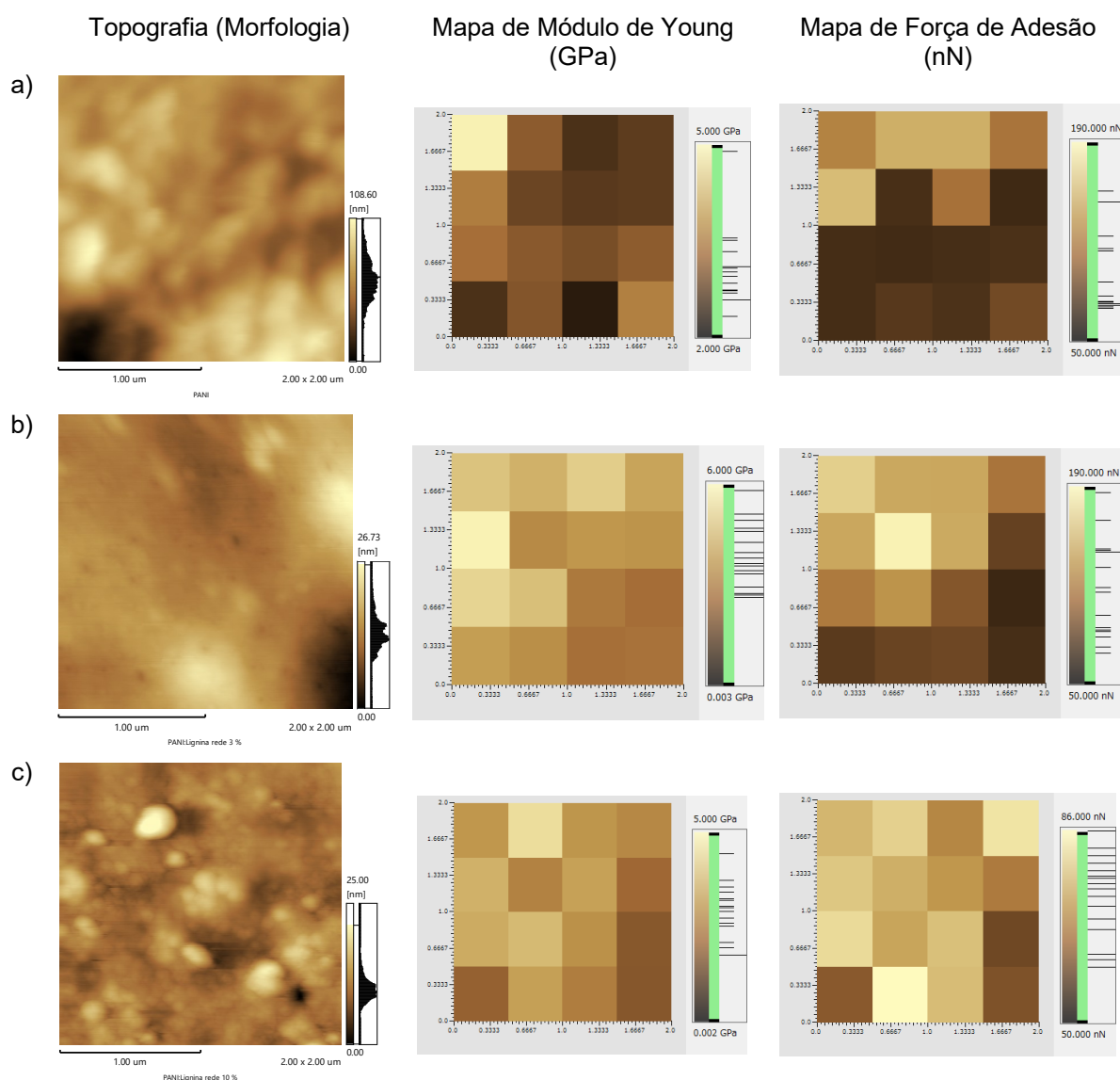


Fonte: Autor (2026)

A análise do gráfico mostrado na Figura 42 revela como a adição de lignina impacta o Módulo de Young em filmes de PANI e PANI:Lignina, todos depositados sobre uma base de SWCNTs/PET.

O filme produzido com PANI pura tem módulo de Young da ordem de 2.8 GPa. Ao incorporar 3% de lignina verifica-se aumento para 4,2 GPa. O filme produzido com 10 % de lignina também apresenta maior valor médio, no entanto com maior dispersão de valores. Este resultado é atribuído ao processo de lavagem realizado durante a síntese, o que leva a variações da concentração entre a PANI e Lignina.

Figura 43 – Imagens de AFM, mapa do Módulo de Young e força de adesão, a) PANI, b) PANI:Lignina (3%) e c) PANI:Lignina (10 %)



Fonte: Autor (2026)

A análise dos resultados do filme de PANI pura, mostrados na Figura 43(a) revela uma topografia com uma variação de altura de aproximadamente 108,60 nm. Ao observar o mapa de módulo de Young, notamos uma variação entre 2 e 5 GPa, com uma distribuição heterogênea de blocos em escala micrométrica. Essa variação sugere a coexistência de regiões com diferentes propriedades viscoelásticas: áreas mais rígidas, que provavelmente correspondem a domínios de PANI mais organizados, e áreas menos rígidas, compostas predominantemente por PANI com menor grau de ordenamento.

Complementarmente, o mapa de força de adesão exibe uma distribuição espacial que reforça essa interpretação, mostrando alta adesão nas zonas menos rígidas e confirmando a presença de uma estrutura compósita com dois tipos distintos de domínios.

Já para o filme com 10% de lignina apresentado na Figura 43(c), observa-se o mapa mecânico mais heterogêneo de todo o conjunto analisado. Tanto a topografia quanto os mapas de módulo de Young e de força de adesão revelam claramente domínios com propriedades mecânicas distintas, visíveis em escala espacial. Isso está em total concordância com a separação de fases avançada que identificamos nas imagens de modo fase mostradas na Figura 41(d). Nesse cenário, as regiões de maior módulo correspondem aos agregados de lignina, enquanto as áreas de menor rigidez representam os domínios residuais de PANI.

4.2 Perfilometria Óptica

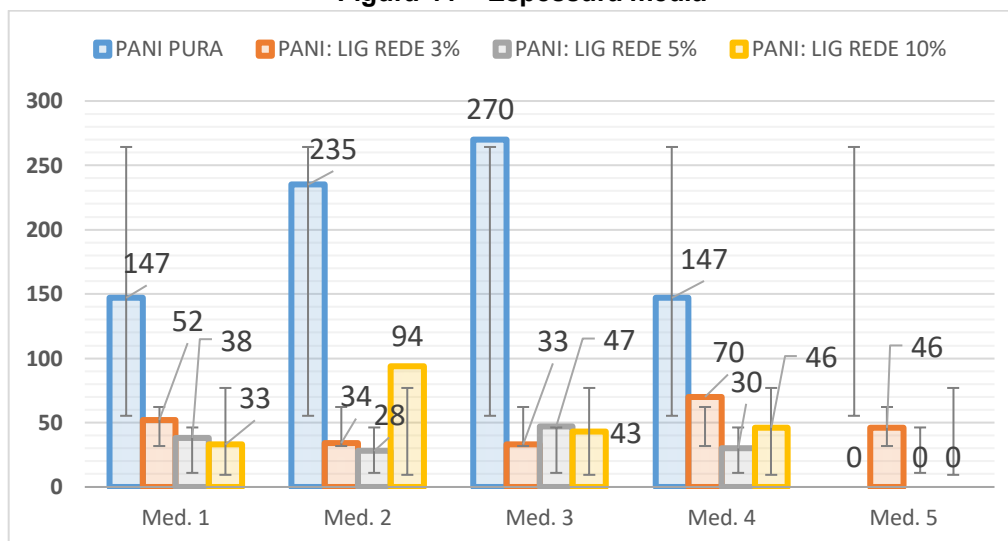
Os resultados de espessura e desvio padrão são mostrados na Tabela 2 e Figura 44

Tabela 2 –Valores de espessura e desvio padrão

Amostras (nm)	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Média	Desvio Padrão ($\pm$)	n
PANI PURA	147,00	235,00	270,00	147,00		199,80	62,60	4
PANI: LIG REDE 3%	52,00	34,00	33,00	70,00	46,00	47,00	15,20	5
PANI: LIG REDE 5%	38,00	28,00	47,00	30,00		35,80	8,70	4
PANI: LIG REDE 10%	33,00	94,00	43,00	46,00		54,00	27,20	4

Fonte: Autor

Figura 44 - Espessura média



Fonte: Autor (2026)

O filme de PANI puro foi o mais espesso analisado, com uma média de $200 \pm 62,6$ nm ($n = 4$). Esse valor, junto com o alto desvio padrão, sugere que a deposição apresentou baixa uniformidade, provavelmente por causa da reologia do material puro durante o processo de *blade coating*.

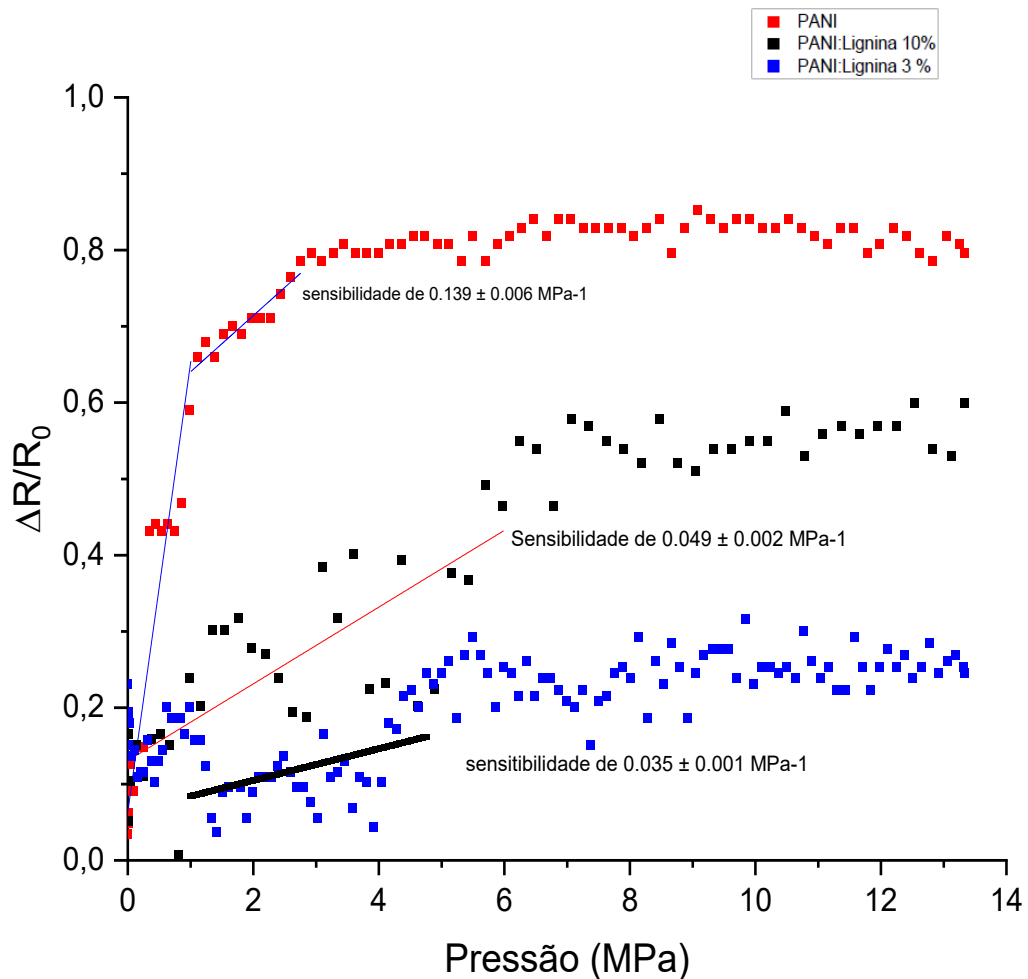
Com adição de 3% de lignina, verifica-se redução da espessura média para 47 ± 15 nm ($n = 5$), que corresponde a uma redução de cerca de 76,5% em comparação com a PANI pura. Essa diminuição é coerente, já que o AFM em modo fase mostrou que a lignina atua como um agente planarizante. Ao ajudar a distribuir os domínios poliméricos de forma mais uniforme, a lignina facilita a formação de filmes mais finos durante o *blade coating*. A concentração de 5% resultou no filme mais fino, com uma espessura média de $35,8 \pm 8,7$ nm ($n = 4$). O filme com 10% de lignina, a espessura média subiu para $54 \pm 27,2$ nm ($n = 4$), apresentando o maior desvio padrão entre as blendas. Esse aumento na espessura e desvio padrão, comparado aos valores das amostras com 3% e 5%, indica que o filme tende a apresentar maior separação de fases nessa faixa de concentração.

4.3 Caracterização eletromecânica

4.3.1 Avaliação da Resposta Piezorresistiva de Compósitos PANI/Lignina sob Pressão Controlada

Neste trabalho, a resposta piezorresistiva dos compósitos foi avaliada sob pressão controlada. Um circuito divisor de tensão acoplado a uma placa Arduino é utilizado para monitorar variação relativa de resistência elétrica ($\Delta R/R_0$). A resposta dos sensores é apresentada na Figura 45.

Figura 45 - Gráfico – Rampas – Comparativo – PANI Pura, PANI Lignina Rede 3% e PANI Lignina Rede 10%

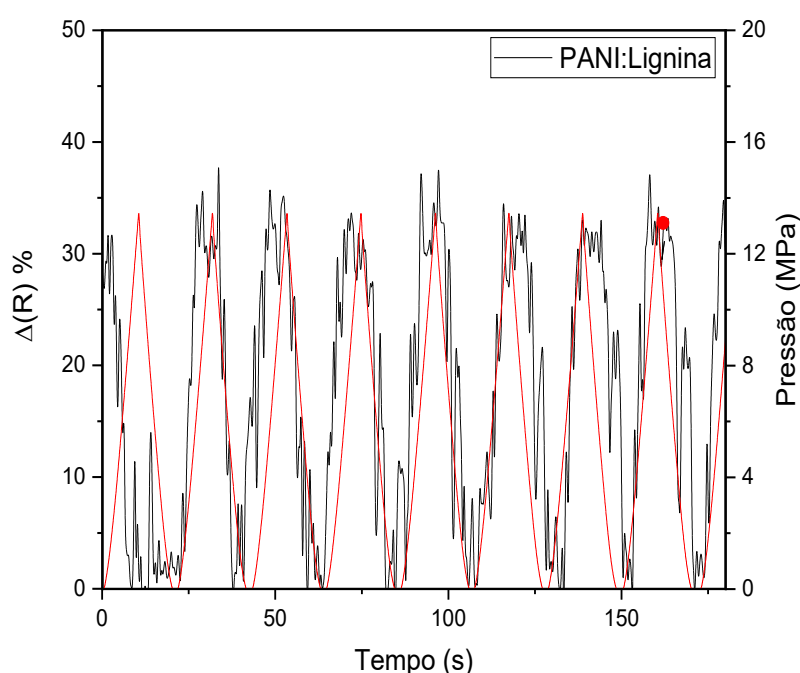


Fonte: Autor (2026)

Comparativamente, a PANI pura exibe a maior variação piezorresistiva. Por exemplo, na faixa entre 0 ~1 MPa apresenta sensibilidade de $0,139 \pm 0,006 \text{ MPa}^{-1}$.

Acima de aproximadamente 2.1 MPa, a curva estabiliza em um platô. O sensor produzido com 3% de lignina mostra uma atenuação significativa da resposta piezorresistiva, mas com indicação de aumento da faixa de resposta até aproximadamente 5 MPa. O mesmo resultado é observado para o sensor produzido com 10 % de lignina, com sensibilidade de $0.049 \pm 0.002 \text{ MPa}^{-1}$, com faixa de operação até 6 MPa.

Figura 46 – Gráfico - Ciclos - PANI Lignina Rede 10%



Fonte: Autor (2026)

A Figura 46 mostra a resposta do sensor produzido com 10 % de Lignina operando em ciclos. O sensor exibe rastreabilidade qualitativa ao estímulo mecânico. Responde com variações positivas de $\Delta R\%$ durante a pressurização e retorna a patamares próximos de zero na despressurização. Os picos máximos de $\Delta R\%$ alcançam valores entre 30% e 38% ao longo dos ciclos, compatíveis com a faixa de resposta identificada nas curvas estáticas para essa composição.

A reprodutibilidade entre ciclos é quantificada pelo coeficiente de variação (CV) dos picos de $\Delta R\%$, definido como a razão entre o desvio padrão e a média dos valores máximos registrados em cada ciclo. Pela análise da Figura 38, os picos de $\Delta R\%$ variam de modo não sistemático entre 30% e 38%, resultando em um coeficiente

de variação (CV) estimado de ~11-13%, o que aponta para uma reprodutibilidade moderada.

4.3.2 Posicionamento em relação ao estado da arte

A Tabela 3 apresenta uma comparação quantitativa dos sensores de pressão desenvolvidos neste trabalho com dispositivos reportados na literatura, reunindo as principais métricas de desempenho.

Tabela 3 – Comparação quantitativa

Material ativo	Substrato	Técnica de deposição	Faixa de pressão	Sensibilidade	$\Delta R/R_0$ máx.	Ref.
PANI pura / SWCNTs	PET/ITO	Blade coating	0–0.8 MPa	0,47-0.60 MPa ⁻¹	~0,8 0	Este trabalho (MACHADO, 2024)
			0.8-2.1 MPa	0,139 MPa ⁻¹		
PANI: Lig. 3% / SWCNTs	PET/ITO	Blade coating	0–5 MPa	0,035 MPa ⁻¹	~0,2 0	Este trabalho
PANI: Lig. 10% / SWCNTs	PET/ITO	Blade coating	0–6 MPa	0,049 MPa ⁻¹	~0,6 0	Este trabalho
PANI / SWCNTs	PET	Blade coating	0–2,1 MPa	0,28 MPa ⁻¹ (0,46–2,1 MPa)	~0,7 0	(Wang et al., 2022)
Lignina-PU / MWCNTs	Espuma de PU	Imersão	0–275,95 kPa	GF = 2,75	—	
PVA / Lig-Ag NPs	Hidrogel	Moldagem	210,75	2,63 kPa ⁻¹	—	(Han et al., 2021)
MXene / PDMS + TPU/MXene	PDMS	Eletrofiação + moldagem	0–25 kPa	82,17 kPa ⁻¹	—	(Wang et al., 2024)
NC-GF / PDMS piramidal	PDMS	Deposição de ouro	0–25 kPa	4,2 kPa ⁻¹	—	(Kim et al., 2024)
C-CNTs/MXene/CCS /LS	Aerogel biodegradável	Congelamento-secagem	0–10 kPa	2,33 kPa ⁻¹	—	(Lu et al., 2024)

Fonte: Autor

Comparando com os resultados reportados na literatura, verifica-se que os sensores produzidos com PANI:Lignina têm aumento da faixa linear de operação para valores da ordem de até 6 MPa. Este comportamento é atribuído ao aumento da resistência mecânica obtido pela incorporação da lignina.

5 CONCLUSÃO

5.1 A Lignina como Elemento Funcional em Sensores Piezorresistivos Flexíveis de SWCNTs/Polianilina

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e caracterizar sensores de pressão flexíveis baseados em filmes de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNTs) e compósitos de polianilina (PANI):lignina, processados por técnicas de baixo custo e elevada reprodutibilidade, como *spin coating* e *blade coating*. Os resultados obtidos demonstram que a estratégia proposta foi bem-sucedida, atendendo aos objetivos estabelecidos e evidenciando o potencial da combinação entre SWCNTs, PANI e lignina para o desenvolvimento de sensores piezorresistivos destinados à eletrônica flexível.

As análises morfológicas por microscopia de força atômica (AFM) mostraram que a incorporação de lignina promove alterações significativas na topografia superficial, na distribuição das fases mecânicas e nas propriedades locais dos filmes, modificando o módulo de Young e a força de adesão. Essas alterações indicam que a lignina não atua apenas como um material de preenchimento, mas participa ativamente da organização estrutural da matriz polimérica, influenciando diretamente o comportamento mecânico e eletromecânico do compósito. A caracterização por perfilometria confirmou ainda a obtenção de filmes homogêneos, compatíveis com a fabricação de dispositivos flexíveis.

Os ensaios eletromecânicos demonstraram que a composição do compósito exerce influência direta sobre a resposta piezorresistiva dos sensores. A polianilina pura apresentou a maior sensibilidade inicial, atingindo aproximadamente $0,47\text{--}0,60\text{ MPa}^{-1}$, característica desejável para aplicações em baixas pressões. Entretanto, observou-se saturação da resposta em torno de 2,1 MPa, limitando sua utilização em aplicações que exigem maior faixa operacional. Por outro lado, a incorporação de lignina reduziu a sensibilidade inicial, porém promoveu uma ampliação significativa da faixa linear de funcionamento. As formulações contendo 3% e 10% de lignina apresentaram sensibilidades de aproximadamente $0,035\text{ MPa}^{-1}$ e $0,049\text{ MPa}^{-1}$, respectivamente, mantendo resposta piezorresistiva até cerca de 6 MPa. Esse comportamento evidencia um importante compromisso entre sensibilidade e faixa de operação, permitindo selecionar a composição do compósito de acordo com os requisitos específicos da aplicação.

Outro resultado relevante refere-se ao desempenho dinâmico dos sensores. Todos os dispositivos apresentaram tempos de resposta inferiores a um segundo, boa repetibilidade durante os ensaios cíclicos e baixa deriva do sinal ao longo das sucessivas aplicações de carga. Esses resultados demonstram que os sensores desenvolvidos possuem estabilidade operacional suficiente para aplicações que envolvem monitoramento contínuo de pressão, nas quais a confiabilidade e a repetibilidade das medições são requisitos fundamentais.

A comparação com trabalhos reportados na literatura demonstra que a estratégia adotada neste estudo apresenta vantagens importantes. Enquanto diversas tecnologias utilizam materiais de elevado custo, estruturas microfabricadas complexas ou processos de fabricação pouco compatíveis com produção em larga escala, os sensores desenvolvidos empregam materiais abundantes, renováveis e economicamente acessíveis, associados a técnicas de deposição simples e escalonáveis. Nesse contexto, destaca-se a utilização da lignina, um dos principais subprodutos da indústria de papel e celulose, cuja incorporação agrega valor a um resíduo industrial abundante, contribuindo para o desenvolvimento de dispositivos mais sustentáveis e alinhados aos princípios da economia circular.

Do ponto de vista científico, este trabalho demonstra que a lignina pode ser utilizada como um elemento funcional para controlar a resposta piezorresistiva de sensores baseados em polianilina. Diferentemente da visão tradicional de que sua função seria apenas atuar como carga ou reforço mecânico, os resultados obtidos mostram que sua incorporação modifica significativamente a microestrutura do compósito e, conseqüentemente, sua resposta eletromecânica. Dessa forma, a proporção de lignina passa a representar um parâmetro de projeto capaz de ajustar a faixa operacional do sensor, possibilitando o desenvolvimento de dispositivos customizados para diferentes aplicações.

Por fim, conclui-se que a arquitetura proposta, baseada em filmes de SWCNTs recobertos por compósitos de PANI:lignina, constitui uma alternativa promissora para o desenvolvimento de sensores de pressão flexíveis, de baixo custo, elevada estabilidade e ampla faixa de operação. Os resultados obtidos confirmam que a combinação entre nanotubos de carbono, polianilina e lignina produz um efeito sinérgico capaz de conciliar boa resposta piezorresistiva, facilidade de processamento e potencial de escalabilidade industrial. Dessa forma, esta dissertação contribui tanto para o avanço do conhecimento sobre compósitos condutores sustentáveis quanto

para o desenvolvimento de novas plataformas de sensores destinados a aplicações em monitoramento estrutural, automação industrial, dispositivos vestíveis e sistemas de eletrônica flexível.

5.2 Trabalhos futuros

As próximas etapas de pesquisa e desenvolvimento para o sensor piezoresistivo incluem a otimização do processo de fabricação e um estudo aprofundado do efeito da temperatura no desempenho.

Também deve ser realizada uma comparação rigorosa com sensores comerciais existentes para avaliar sua competitividade. Os sensores devem ser submetidos a testes para monitoramento de pressão em fluidos, como gases ou vapores.

Devem ser testados com um número maior de ciclos para verificar a resistência mecânica, resiliência e comportamento em situações de fadiga.

REFERÊNCIAS

© LAUMAS ELETTRONICA S.R.L. **Os principais tipos de células de carga.** Disponível em: <<https://www.laumas.com/pt/blog/produtos/os-principais-tipos-de-celulas-de-carga/>>. Acesso em: 3 jun. 2026.

ABDELSALAM, Dahi Ghareab; YAO, Baoli. Interferometry and its Applications in Surface Metrology. *In: Optical Interferometry*. [S.l.]: InTech, 2017.

ALTAMAR-MERCADO, Hernando; PATIÑO-VANEGAS, Alberto; MARRUGO, Andres G. Robust 3D surface recovery by applying a focus criterion in white light scanning interference microscopy. **Applied Optics**, v. 58, n. 5, p. 1, 10 fev. 2019.

APEX INSTRUMENTS CO. **Spin coating da Apex Instruments.**

ARIAS-FERREIRO, Goretti *et al.* Photocurable Printed Piezocapacitive Pressure Sensor Based on an Acrylic Resin Modified with Polyaniline and Lignin. **Advanced Materials Technologies**, v. 7, n. 8, 16 ago. 2022.

AZADI, Pooya *et al.* Liquid fuels, hydrogen and chemicals from lignin: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 506–523, maio 2013.

BAJAJ, Chandrajit; FAVATA, Antonino; PODIO-GUIDUGLI, Paolo. On a nanoscopically-informed shell theory of single-wall carbon nanotubes. **European Journal of Mechanics - A/Solids**, v. 42, p. 137–157, nov. 2013.

BARYSHEV, Sergey V. *et al.* Characterization of Surface Modifications by White Light Interferometry: Applications in Ion Sputtering, Laser Ablation, and Tribology Experiments. **Journal of Visualized Experiments**, n. 72, 27 fev. 2013.

BEYGISANGCHIN, Mahnoush *et al.* Preparations, Properties, and Applications of Polyaniline and Polyaniline Thin Films—A Review. **Polymers**, v. 13, n. 12, p. 2003, 18 jun. 2021.

BHADRA, Jolly; ALKAREEM, Asma; AL-THANI, Noora. A review of advances in the preparation and application of polyaniline based thermoset blends and composites. **Journal of Polymer Research**, v. 27, n. 5, p. 122, 25 maio 2020.

BHUSHAN, Bharat; QI, Jun. Phase contrast imaging of nanocomposites and molecularly thick lubricant films in magnetic media. **Nanotechnology**, v. 14, n. 8, p. 886–895, 1 ago. 2003.

BINNIG, G.; QUATE, C. F.; GERBER, Ch. Atomic Force Microscope. **Physical Review Letters**, v. 56, n. 9, p. 930–933, 3 mar. 1986.

BORODICH, Feodor M.; PEPELYSHEV, Andrey; SAVENCU, Ovidiu. Statistical approaches to description of rough engineering surfaces at nano and microscale. **Tribology International**, v. 103, p. 197–207, nov. 2016.

BRAIN4CARE. **Sensor que monitora pressão dentro da cabeça sem furo nem dor é destaque na HospitalMed 2021, em Recife**. Disponível em: <<https://brain4.care/sensor-que-monitora-pressao-dentro-da-cabeca-sem-furo-nem-dor-e-destaque-na-hospitalmed-2021-em-recife/>>. Acesso em: 3 jun. 2026.

BROZA, Georg. Synthesis, properties, functionalisation and applications of carbon nanotube: a state of the art review. **Chemistry & Chemical Technology**, v. 4, n. 1, p. 35–45, 20 mar. 2010.

CABER, Paul J. Interferometric profiler for rough surfaces. **Applied Optics**, v. 32, n. 19, p. 3438, 1 jul. 1993.

CASCUDO, Oswaldo *et al.* Contribuição à caracterização nanoestrutural de pastas de cimento por meio da técnica de Microscopia de Força Atômica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 1, 5 mar. 2018.

CHEN, Baodeng *et al.* Superhydrophobic and flame-retardant chitosan/ammonium polyphosphate/montmorillonite aerogel-based piezoresistive pressure sensor for human motion detection. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 369, p. 115135, 16 abr. 2024.

COSTA, Nicolay Rosario da. **Avaliação dos processos de incorporação da lignina em composições de borracha nitrílica**. Rio de Janeiro: [S.n.]. Disponível em: <<http://www.bdttd.uerj.br/handle/1/23853>>. Acesso em: 14 mar. 2026.

CREATIVE COMMONS. Arduino® UNO R3 Datasheet. 21 abr. 2026.

DE GROOT, Peter; DECK, Leslie. Surface Profiling by Analysis of White-light Interferograms in the Spatial Frequency Domain. **Journal of Modern Optics**, v. 42, n. 2, p. 389–401, fev. 1995.

DE SOUZA GOMES, Ailton (ORG.). **New Polymers for Special Applications**. [S.l.]: InTech, 2012.

DIAO, Ying *et al.* Morphology control strategies for solution-processed organic semiconductor thin films. **Energy Environ. Sci.**, v. 7, n. 7, p. 2145–2159, 2014.

DIGITAL SURF. **MountainsMap® Surface Imaging & Metrology Software**. Digital Surf.

DOKUKIN, Maxim E.; SOKOLOV, Igor. Quantitative Mapping of the Elastic Modulus of Soft Materials with HarmoniX and PeakForce QNM AFM Modes. **Langmuir**, v. 28, n. 46, p. 16060–16071, 20 nov. 2012.

DOS SANTOS, Hélio F. Análise conformacional de modelos de lignina. **Química Nova**, v. 24, n. 4, p. 480–490, ago. 2001.

FAYAD, Elias E. **CARACTÉRISATIONS OPTIQUES, MORPHOLOGIQUES ET ÉLECTRIQUES D'OLIGOANILINES : APPLICATION POUR LES CAPTEURS**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://theses.hal.science/tel-00454028v1>>.

FERNANDES, Renan H. S.; PETRI, Denise F. S. Rumo a embalagens sustentáveis: o papel da lignina na química verde. *In: 13º Workshop do Programa de Mestrado Profissional em Tecnologia em Química e Bioquímica da USP*. [S.l.]: Editora Blucher, 2026. p. 111–149.

FRENCH, Roger H. *et al.* Long range interactions in nanoscale science. **Reviews of Modern Physics**, v. 82, n. 2, p. 1929, 11 jun. 2010.

FUJI ELECTRIC. **Definição do sensor de pressão**. Disponível em: <<https://www.fujielectric.fr/pt/blogue/definicao-de-sensor-de-pressao/>>. Acesso em: 3 jun. 2026.

GIANTO, Gianto *et al.* **Multi-dimensional Teager-Kaiser signal processing for improved characterization using white light interferometry**. [S.l.]: Strasbourg, 14 set. 2018.

GONÇALVES, Bruna. Desenvolvimento de uma matriz de sensores piezoresistivos baseados em técnicas de impressão. set. 2015.

GU, Xiaodan *et al.* The meniscus-guided deposition of semiconducting polymers. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 534, 7 fev. 2018.

HADANO, Fábio Seiti. **Sensores semicondutores poliméricos planares para detecção de amônia**. Curitiba: [S.n.]. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4820>>. Acesso em: 14 mar. 2026.

HAN, Xiao *et al.* Green and stable piezoresistive pressure sensor based on lignin-silver hybrid nanoparticles/polyvinyl alcohol hydrogel. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 176, p. 78–86, 15 abr. 2021.

HATA, Kenji. A super-growth method for single-walled carbon nanotube synthesis. **Synthesiology English edition**, v. 9, n. 3, p. 167–179, 2016.

HE, Baofeng *et al.* A review of digital filtering in evaluation of surface roughness. **Metrology and Measurement Systems**, p. 217–253, 23 fev. 2021.

HERBERT, Holik. **Handbook of Paper and Board**. [S.l.]: Wiley-VCH ; [John Wiley, distribuidor], 2006.

HUANG, Bingfang *et al.* High Sensitivity and Wide Linear Range Flexible Piezoresistive Pressure Sensor with Microspheres as Spacers for Pronunciation Recognition. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 16, n. 15, p. 19298–19308, 17 abr. 2024.

INSTRON. **Série 23 EMIC**. Norwood, MA: [S.n.].

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 13565-2**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/0f132785-27f2-4acc-b678-5ad49a684da3/iso->>.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 4287**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/bca23b2c-7009-4a38-b6e5->](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/bca23b2c-7009-4a38-b6e5-).

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 25178-604**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f5053ba3-6c9f-4d7e-bf72-a854b8733f65/Webwww.iso.orghttps://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f5053ba3-6c9f-4d7e-bf72-a854b8733f65/>](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f5053ba3-6c9f-4d7e-bf72-a854b8733f65/Webwww.iso.orghttps://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/f5053ba3-6c9f-4d7e-bf72-a854b8733f65/).

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 25178-2**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <www.iso.org>.

KIM, Seong Won *et al.* Mechanically Robust and Linearly Sensitive Soft Piezoresistive Pressure Sensor for a Wearable Human–Robot Interaction System. **ACS Nano**, v. 18, n. 4, p. 3151–3160, 30 jan. 2024.

KONDO, Masaya *et al.* Highly-ordered Triptycene Modifier Layer Based on Blade Coating for Ultraflexible Organic Transistors. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 9200, 24 jun. 2019.

KUMAR, Adarsh *et al.* Utilization of lignin: A sustainable and eco-friendly approach. **Journal of the Energy Institute**, v. 93, n. 1, p. 235–271, 1 fev. 2020.

LI, Feng-Chao *et al.* Advances in flexible piezoresistive pressure sensor. **Acta Physica Sinica**, v. 70, n. 10, p. 100703, 2021a.

LI, Mingfu *et al.* Flexible conductive hydrogel fabricated with polyvinyl alcohol, carboxymethyl chitosan, cellulose nanofibrils, and lignin-based carbon applied as strain and pressure sensor. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 166, p. 1526–1534, 1 jan. 2021b.

LU, Han *et al.* Biobased, degradable and directional porous carboxymethyl chitosan/lignosulfonate sodium aerogel-based piezoresistive pressure sensor with dual-conductive network for human motion detection. **Chemical Engineering Journal**, v. 497, p. 154868, 1 out. 2024.

M. A. ALSHAREF, Jamal; TAHA, Mohd Raihan; AHMED KHAN, Tanveer. PHYSICAL DISPERSION OF NANOCARBONS IN COMPOSITES—A REVIEW. **Jurnal Teknologi**, v. 79, n. 5, p. 2180–3722, 21 jun. 2017.

MACHADO, Amanda Louise. **Aplicação de compósitos PANI: SWCNTs em sensores de pressão. 2024. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024.** Curitiba: [S.n.]. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/34605>>.

MITTAL, M.; KUMAR, A. Carbon nanotube (CNT) gas sensors for emissions from fossil fuel burning. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 203, p. 349–362, nov. 2014.

MONAVARI, Seyyed Mostafa *et al.* Carbon nanotubes and nanobelts as potential materials for biosensor. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 3118, 22 fev. 2023.

MORENO, Adrian; SIPPONEN, Mika H. Lignin-based smart materials: a roadmap to processing and synthesis for current and future applications. **Materials Horizons**, v. 7, n. 9, p. 2237–2257, 2020.

MOTA, María L. *et al.* Synthesis and Novel Purification Process of PANI and PANI/AgNPs Composite. **Molecules**, v. 24, n. 8, p. 1621, 24 abr. 2019.

PAYERNE, Renaud. **STRUCTURE ET PROPRIETES ELECTRONIQUES A DIFFERENTES ECHELLES DE SYSTEMES MODELES DE POLYMERES CONDUCTEURS ET SEMI-CONDUCTEURS**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://theses.hal.science/tel-00008954v1>>.

POLSEN, Erik S. **ROBUST SYNTHESIS AND CONTINUOUS MANUFACTURING OF CARBON NANOTUBE FORESTS AND GRAPHENE FILMS**. [S.l.: S.n.].

POPOV, V. Carbon nanotubes: properties and application. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 43, n. 3, p. 61–102, 15 jan. 2004.

RANA, M. S.; POTA, H. R.; PETERSEN, I. R. Improvement in the Imaging Performance of Atomic Force Microscopy: A Survey. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 14, n. 2, p. 1265–1285, abr. 2017.

RODGERS, Mary M.; PAI, Vinay M.; CONROY, Richard S. Recent Advances in Wearable Sensors for Health Monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 15, n. 6, p. 3119–3126, 1 jun. 2015.

RODRIGUES, Paula C. *et al.* Polyaniline/lignin blends: thermal analysis and XPS. **European Polymer Journal**, v. 37, n. 11, p. 2217–2223, nov. 2001.

RODRIGUES, Paula C. *et al.* Polyaniline/lignin blends: FTIR, MEV and electrochemical characterization. **European Polymer Journal**, v. 38, n. 11, p. 2213–2217, nov. 2002.

SALIBA, Eloísa de Oliveira Simões *et al.* Ligninas: métodos de obtenção e caracterização química. **Ciência Rural**, v. 31, n. 5, p. 917–928, out. 2001.

SAPURINA, I. Yu.; SHISHOV, M. A. Oxidative Polymerization of Aniline: Molecular Synthesis of Polyaniline and the Formation of Supramolecular Structures. In: **New Polymers for Special Applications**. [S.l.]: InTech, 2012.

SCHWAIGHOFER, Michael *et al.* Characterization of mechanical properties of five hot-pressed lignins extracted from different feedstocks by microscopy-aided nanoindentation. **Materials & Design**, v. 227, p. 111765, 1 mar. 2023.

SEESAARD, Thara; WONGCHOOSUK, Chatchawal. Flexible and Stretchable Pressure Sensors: From Basic Principles to State-of-the-Art Applications. **Micromachines**, v. 14, n. 8, p. 1638, 20 ago. 2023.

SEK, Piotr. The Use of Statistical Functions for the Selection of Laser Texturing Parameters. **Open Engineering**, v. 10, n. 1, p. 454–461, 10 jun. 2020.

SENNA, André M.; MENEZES, Aparecido J. de; BOTARO, Vagner R. Estudo da densidade de ligações Cruzadas em géis superabsorventes obtidos do acetato de celulose. **Polímeros**, v. 23, n. 1, p. 59–64, 18 dez. 2012.

SEO, Jin Ho *et al.* Preparation of a lignin/polyaniline composite and its application in Cr(VI) removal from aqueous solutions. **BioResources**, v. 14, n. 4, p. 9169–9182, 4 out. 2019.

SHIMADZU CORPORATION. **Contributing to the New Development for the Observation and Evaluation of High Polymer and Battery Materials, and Nano Materials Release of SPM-9700HT Plus Scanning Probe Microscope, Ten Times Faster than Previous Models.**

SOUZA JR, Fernando G. de *et al.* Modificação da fibra de coco com polianilina e o seu uso como sensor de pressão. **Polímeros**, v. 21, n. 1, p. 39–46, 25 fev. 2011.

SUN, Fenglin *et al.* Carbon Quantum Dot/Multiwalled Carbon Nanotube-Based Self-Powered Strain Sensors for Remote Human Motion Detection. **ACS Applied Nano Materials**, v. 7, n. 23, p. 27706–27716, 13 dez. 2024.

TAGUET, A.; CASSAGNAU, P.; LOPEZ-CUESTA, J. M. Structuration, selective dispersion and compatibilizing effect of (nano)fillers in polymer blends. **Progress in Polymer Science**, v. 39, n. 8, p. 1526–1563, ago. 2014.

TAYLOR HOBSON. **Talysurf CCI 3D Non-Contact Surface Profiler System User's Guide.** Thurmaston Lane: [S.n.].

TAYLOR HOBSON. **Talysurf CCI - Lite Non-contact 3D Profiler.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <www.taylor-hobson.com>.

TODHUNTER, L. D. *et al.* An analysis of type F2 software measurement standards for profile surface texture parameters. **Measurement Science and Technology**, v. 28, n. 6, p. 065017, 1 jun. 2017.

TSAO, Hoi Nok; MÜLLEN, Klaus. Improving polymer transistor performance via morphology control. **Chemical Society Reviews**, v. 39, n. 7, p. 2372, 2010.

UTFPR. **Interferômetro de Luz Branca (Taylor Hobson, modelo Talysurf CCI Lite M12-3993-03).**

VEGA. **Soluções confiáveis com sensores para a indústria de papel.** Disponível em: <<https://www.vega.com/pt-br/industrias/industria-de-papel>>. Acesso em: 3 jun. 2026.

WALLACE, Joseph M. Applications of atomic force microscopy for the assessment of nanoscale morphological and mechanical properties of bone. **Bone**, v. 50, n. 1, p. 420–427, jan. 2012.

WANG, Fan *et al.* Flexible, recyclable and sensitive piezoresistive sensors enabled by lignin polyurethane-based conductive foam. **Materials Advances**, v. 4, n. 2, 12 dez. 2022.

WANG, Meng *et al.* High-performance flexible piezoresistive pressure sensor based on multi-layer interlocking microstructures. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 12, n. 34, p. 22931–22944, 31 jul. 2024.

WF SENSORS. **Sensores de pressão nos monitores de pressão arterial.**

Disponível em: <<https://wfsensors.com/pt/blog/pressure-sensors-in-blood-pressure-monitors.html/>>. Acesso em: 3 jun. 2026.

WILSON, Stephen A. *et al.* New materials for micro-scale sensors and actuators. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 56, n. 1–6, p. 1–129, jun. 2007.

WU, Lin. Spin coating of thin liquid films on an axisymmetrically heated disk. **Physics of Fluids**, v. 18, n. 6, 1 jun. 2006.

WU, Ruili *et al.* Flexible PANI/SWCNT thermoelectric films with ultrahigh electrical conductivity. **RSC Advances**, v. 8, n. 46, p. 26011–26019, 2018.

XIAO, Yao *et al.* Flexible pressure sensor based on polystyrene foam with superelasticity and ultra-wide range. **Smart Materials and Structures**, v. 32, n. 4, p. 045006, 1 abr. 2023.

XU, Gaokai; XING, Xuanshuo. Advancements in carbon nanotube-based sensors for human motion detection. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 30, 2025.

XU, Peng *et al.* Design and verification of micro/nano probes for coordinate measuring machines (Withdrawal Notice). In: YU, Liandong; YANG, Lian X.; XIA, Haojie (orgs.). SPIE, 19 nov. 2021. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12059/2613440/Design-and-verification-of-micro-nano-probes-for-coordinate-measuring/10.1117/12.2613440.full>>

ZHANG, Yajie *et al.* Multifunctional interlocked e-skin based on elastic micropattern array facilely prepared by hot-air-gun. **Chemical Engineering Journal**, v. 407, p. 127960, 1 mar. 2021a.

ZHANG, Ying *et al.* Graded bulk-heterojunction enables 17% binary organic solar cells via nonhalogenated open air coating. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 4815, 10 ago. 2021b.

ANEXO A - Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



**Presidência da República
Casa Civil
Subchefia para Assuntos Jurídicos**

LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998¹.

Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

O PRESIDENTE DA REPÚBLICA Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Título I - Disposições Preliminares

Art. 1º Esta Lei regula os direitos autorais, entendendo-se sob esta denominação os direitos de autor e os que lhes são conexos.

Art. 2º Os estrangeiros domiciliados no exterior gozarão da proteção assegurada nos acordos, convenções e tratados em vigor no Brasil.

Parágrafo único. Aplica-se o disposto nesta Lei aos nacionais ou pessoas domiciliadas em país que assegure aos brasileiros ou pessoas domiciliadas no Brasil a reciprocidade na proteção aos direitos autorais ou equivalentes.

Art. 3º Os direitos autorais reputam-se, para os efeitos legais, bens móveis.

Art. 4º Interpretam-se restritivamente os negócios jurídicos sobre os direitos autorais.

Art. 5º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - publicação - o oferecimento de obra literária, artística ou científica ao conhecimento do público, com o consentimento do autor, ou de qualquer outro titular de direito de autor, por qualquer forma ou processo;

II - transmissão ou emissão - a difusão de sons ou de sons e imagens, por meio de ondas radioelétricas; sinais de satélite; fio, cabo ou outro condutor; meios óticos ou qualquer outro processo eletromagnético;

III - retransmissão - a emissão simultânea da transmissão de uma empresa por outra;

IV - distribuição - a colocação à disposição do público do original ou cópia de obras literárias, artísticas ou científicas, interpretações ou execuções fixadas e fonogramas, mediante a venda, locação ou qualquer outra forma de transferência de propriedade ou posse;

V - comunicação ao público - ato mediante o qual a obra é colocada ao alcance do público, por qualquer meio ou procedimento e que não consista na distribuição de exemplares;

VI - reprodução - a cópia de um ou vários exemplares de uma obra literária, artística ou científica ou de um fonograma, de qualquer forma tangível, incluindo qualquer armazenamento permanente ou temporário por meios eletrônicos ou qualquer outro meio de fixação que venha a ser desenvolvido;

VII - contrafação - a reprodução não autorizada;

VIII - obra:

a) em coautoria - quando é criada em comum, por dois ou mais autores;

b) anônima - quando não se indica o nome do autor, por sua vontade ou por ser desconhecido;

c) pseudônima - quando o autor se oculta sob nome suposto;

d) inédita - a que não haja sido objeto de publicação;

e) póstuma - a que se publique após a morte do autor;

f) originária - a criação primígena;

g) derivada - a que, constituindo criação intelectual nova, resulta da transformação de obra originária;

h) coletiva - a criada por iniciativa, organização e responsabilidade de uma pessoa física ou jurídica, que a publica sob seu nome ou marca e que é constituída pela participação de diferentes autores, cujas contribuições se fundem numa criação autônoma;

i) audiovisual - a que resulta da fixação de imagens com ou sem som, que tenha a finalidade de criar, por meio de sua reprodução, a impressão de movimento, independentemente dos processos de sua captação, do suporte usado inicial ou posteriormente para fixá-lo, bem como dos meios utilizados para sua veiculação;

IX - fonograma - toda fixação de sons de uma execução ou interpretação ou de outros sons, ou de uma representação de sons que não seja uma fixação incluída em uma obra audiovisual;

X - editor - a pessoa física ou jurídica à qual se atribui o direito exclusivo de reprodução da obra e o dever de divulgá-la, nos limites previstos no contrato de edição;

XI - produtor - a pessoa física ou jurídica que toma a iniciativa e tem a responsabilidade econômica da primeira fixação do fonograma ou da obra audiovisual, qualquer que seja a natureza do suporte utilizado;

XII - radiodifusão - a transmissão sem fio, inclusive por satélites, de sons ou imagens e sons ou das representações desses, para recepção ao público e a transmissão de sinais codificados, quando os meios de decodificação sejam oferecidos ao público pelo organismo de radiodifusão ou com seu consentimento;

XIII - artistas intérpretes ou executantes - todos os atores, cantores, músicos, bailarinos ou outras pessoas que representem um papel, cantem, recitem, declamem, interpretem ou executem em qualquer forma obras literárias ou artísticas ou expressões do folclore.

Art. 6º Não serão de domínio da União, dos Estados, do Distrito Federal ou dos Municípios as obras por eles simplesmente subvencionadas.

¹ Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19610.htm.