



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS BLUMENAU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA TÊXTIL

Amanda Schuch

Materiais têxteis condutores baseados em malha *spacer* por trama revestida com polianilina  
para dispositivos *wearables*

BLUMENAU

2025

Amanda Schuch

Materiais têxteis condutores baseados em malha *spacer* por trama revestida com polianilina para dispositivos *wearables*

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Têxtil.

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Steffens

Coorientadoras: Profa. Dra. Claudia Merlini

BLUMENAU

2025

Schuch, Amanda

Materiais têxteis condutores baseados em malha spacer por trama revestida com polianilina para dispositivos wearables : Materiais têxteis condutores baseados em malha spacer por trama revestida com polianilina para dispositivos wearables / Amanda Schuch ; orientador, Fernanda Steffens, coorientador, Claudia Merlini, 2025.

83 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Têxteis eletrônicos. 3. Malha spacer. 4. Condutividade elétrica. 5. Polímeros intrinsecamente condutores. I. Steffens, Fernanda. II. Merlini, Claudia . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil. IV. Título.

Amanda Schuch

**Título: Materiais têxteis condutores baseados em malha *spacer* por trama revestida com polianilina para dispositivos *wearables*.**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 19 de setembro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Miguel Angelo Granato, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Johnny de Nardi Martins, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia têxtil.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof.(a) Fernanda Steffens, Dr.(a)  
Orientador(a)

BLUMENAU

2025

Este trabalho é dedicado à Deus e a minha família.

## **Agradecimentos**

A Deus, por Sua presença constante e pela força ao longo de toda minha trajetória acadêmica.

Aos meu pais Simone e Osmarino e ao meu irmão André, por seu amor e incentivo incondicional.

Ao meu esposo, Roberto, agradeço o companheirismo, paciência e incentivo, elementos essenciais para a superação dos desafios enfrentados durante este percurso.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela infraestrutura disponibilizada, pelos laboratórios e pelos recursos que viabilizaram a execução da etapa experimental desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), agradeço o apoio financeiro por meio da bolsa concedida pelo edital 48/2021 para a realização deste trabalho.

Às professoras Fernanda e Claudia, minhas orientadoras, expresso minha sincera gratidão pela orientação, pelo comprometimento acadêmico e pelas contribuições que enriqueceram este trabalho.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Professor Miguel e Professor Johnny, por participarem deste processo, bem como pelas observações e sugestões que contribuíram significativamente para o aprimoramento desta dissertação.

Estendo meus agradecimentos a Lucas Simon, Daniel e Mateus, pelo apoio durante os ensaios experimentais, os quais foram determinantes para o desenvolvimento deste estudo.

A todos os mencionados, muito obrigada.

“Dai-me, Senhor, a perseverança das ondas do mar, que fazem de cada recuo um ponto de partida para um novo avançar.”  
(Cecília Meireles)

## RESUMO

*Wearables* são dispositivos vestíveis com capacidade de monitoramento e transmissão de dados fisiológicos e ambientais em tempo real, como sinais vitais, ritmo respiratório, contagem de passos e desempenho físico. O avanço dos *wearables* exige o desenvolvimento de materiais inovadores, capazes de interagir com o ambiente e responder a estímulos químicos, mecânicos, elétricos e térmicos. Entre os desafios técnicos, destacam-se a produção de estruturas leves, flexíveis, respiráveis e confortáveis ao uso prolongado, além de funcionarem sem a necessidade de cabos ou baterias rígidas. Além disso, esses sistemas podem integrar tecnologias digitais aos materiais têxteis, criando plataformas inteligentes para aplicação em áreas como saúde, esporte, segurança e moda, dando origem aos *wearables* têxteis. Os polímeros intrinsecamente condutores, como a polianilina (PANI), têm-se mostrado promissores pois combinam propriedades elétricas com relativa facilidade de síntese, além de serem economicamente viáveis e quimicamente estáveis. Portanto, este estudo tem como objetivo desenvolver um *wearable* condutor por meio da polimerização *in situ* da PANI sobre a superfície de uma malha *spacer* por trama, visando criar um substrato têxtil funcional para aplicações eletrônicas. Foram exploradas diferentes concentrações da solução de anilina (0,05 mol/L, 0,10 mol/L e 0,20 mol/L). Foram realizadas análises térmicas (DSC e TGA), ensaios de condutividade, com o objetivo de caracterizar o desempenho físico-químico e funcional do substrato têxtil polimerizado. Para avaliar a resposta piezoresistiva do material sob ciclos de compressão e descompressão foi realizado o ensaio eletromecânico. A simulação de usabilidade foi conduzida por meio de ensaios de solidez à lavagem, resistência à abrasão e tração e simulação do substrato quando em contato com o corpo humano por meio da resistência ao suor, tanto ácido como alcalina, buscando avaliar a durabilidade do material e seu desempenho de condutividade elétrica em condições reais de uso. A espectroscopia FTIR confirmou a presença da PANI, enquanto as análises térmicas (DSC e TGA) indicaram modificações na estabilidade térmica e menor perda de massa em altas temperaturas. A resistência à abrasão revelou falhas após 4.000 ciclos e queda na condutividade elétrica, atribuídas à remoção da camada condutora. O ensaio de solidez à lavagem mostrou redução da condutividade por desdopagem, embora com desempenho ainda satisfatório. Já a exposição ao suor ácido e alcalino causou leve perda de condutividade, sendo o suor alcalino mais agressivo. No conjunto, os resultados indicam que a PANI apresenta bom potencial para aplicações em têxteis inteligentes, com desempenho promissor frente aos desafios mecânicos, térmicos e químicos.

**Palavras-chave:** Polímeros intrinsecamente condutores; Têxteis inteligentes; Têxteis eletrônicos; Condutividade elétrica.

## ABSTRACT

Wearables are wearable devices capable of monitoring and transmitting physiological and environmental data in real time, such as vital signs, respiratory rate, step count, and physical performance. The advancement of wearables requires the development of innovative materials capable of interacting with the environment and responding to chemical, mechanical, electrical, and thermal stimuli. Among the technical challenges, we highlight the production of lightweight, flexible, breathable, and comfortable structures for prolonged use, in addition to operating without the need for cables or rigid batteries. Furthermore, these systems can integrate digital technologies with textile materials, creating smart platforms for application in areas such as healthcare, sports, security, and fashion, giving rise to textile wearables. Intrinsically conductive polymers, such as polyaniline (PANI), have shown promise because they combine electrical properties with relative ease of processing, in addition to being economically viable and chemically stable. Therefore, this study aims to develop a conductive wearable through the in situ polymerization of PANI on the surface of a woven spacer mesh, aiming to create a functional textile substrate for electronic applications. Different concentrations of the aniline solution (0.05 mol/L, 0.10 mol/L, and 0.20 mol/L) were explored. Thermal analyses (DSC and TGA) and conductivity tests were performed to characterize the physicochemical and functional performance of the polymerized textile substrate. To evaluate the piezoresistive response of the material under compression and decompression cycles, an electromechanical test was performed. Usability simulation was conducted through wash fastness, abrasion and tensile resistance tests, and simulation of the substrate when in contact with the human body through sweat resistance, both acidic and alkaline, to evaluate the durability of the material and its electrical conductivity performance under real-life conditions. The tests demonstrated that functionalization of the mesh with polyaniline (PANI) promotes relevant structural and functional changes. FTIR spectroscopy confirmed the presence of PANI, while thermal analyses (DSC and TGA) indicated changes in thermal stability and reduced mass loss at high temperatures. Abrasion resistance revealed failures after 4,000 cycles and a drop in electrical conductivity, attributed to the removal of the conductive layer. The wash fastness test showed a reduction in conductivity due to dedoping, although performance remained satisfactory. Exposure to acidic and alkaline sweat caused a slight loss of conductivity, with alkaline sweat being more aggressive. Overall, the results indicate that PANI has good potential for applications in smart textiles, with promising performance in the face of mechanical, thermal, and chemical challenges.

**Keywords:** Intrinsically conductive polymers; Smart textiles; Electronic textiles; Electrical conductivity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos têxteis inteligentes.....	21
Figura 2 – Classificação dos têxteis técnicos .....	30
Figura 3 – Esquema ilustrativo de malha <i>spacer</i> .....	32
Figura 4 – Reação química de formação do poliéster .....	34
Figura 5 – Estrutura química da polianilina .....	38
Figura 6 – Etapas de polimerização <i>in situ</i> da polianilina .....	43
Figura 7 – Amostras antes a) e após o revestimento com a polianilina, b) 0,05 mol/L, c) 1,0 mol/L e c) 2,0 mol/L .....	49
Figura 8 – Avaliação da condutividade elétrica do substrato com diferentes concentrações de PANI .....	50
Figura 9 – MEV da malha antes do revestimento (a, b) e após o revestimento com concentrações de (c, d) 0,05 mol/L, (e, f) 0,10 mol/L, (g, h) 0,20 mol/L, ampliações 50x e 500x .....	52
Figura 10 – Malha revestida com PANI, obtida com concentração de 0,05 mol/L de anilina: resposta piezoresistiva ( $\Delta R/R_0$ ) em % e tensão de compressão em (a) 250 kPa, (b) 500 kPa e (c) 1000 kPa em função do tempo de ensaio.....	55
Figura 11 – Malha revestida com PANI, obtida com concentração de 0,10 mol/L de anilina: resposta piezoresistiva ( $\Delta R/R_0$ ) em % e tensão de compressão em (a) 250 kPa, (b) 500 kPa e (c) 1000 kPa em função do tempo de ensaio.....	56
Figura 12 – Malha revestida com PANI, obtida com concentração de 0,20 mol/L de anilina: resposta piezoresistiva ( $\Delta R/R_0$ ) em % e tensão de compressão em (a) 250 kPa, (b) 500 kPa e (c) 1000 kPa em função do tempo de ensaio.....	57
Figura 13 – PS em kPa em função da taxa de carga em kPa.s <sup>-1</sup> para as amostras com concentração de 0,05 mol/L, 0,1 mol/L e 0,2 mol/L .....	58
Figura 14 – FTIR das amostras antes e após o revestimento (concentração de 0,01 mol/L) .....	59
Figura 15 – DSC da malha com concentração de 0,10 mol/L antes e após a funcionalização com polianilina .....	60
Figura 16 –a) TGA e b) DTG da malha com concentração de 0,10 mol/L antes e após a funcionalização com polianilina .....	61
Figura 17 – Curva tensão x deformação da malha spacer antes e após funcionalizar, na direção da (a) coluna e (b) fileira com concentração de 0,10 mol/L de ANI.....	63

Figura 18 – Resistência à abrasão das amostras sem e com polianilina, após: (a) 0 ciclos; (b) 1.000 ciclos; (c) 2.000 ciclos; (d) 3.000 ciclos; (e) 4.000 ciclos; e (f) 5.000 ciclos, para as amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/L de ANI.....	65
Figura 19 – Condutividade elétrica antes e após o ensaio de abrasão para as amostras de malha revestida com PANI .....	67
Figura 20 – MEV a) antes (ampliação de 50x) e b) após o ensaio de abrasão (ampliação de 50x), b) antes (ampliação de 1000x) e b) após o ensaio de abrasão (ampliação de 1000x) para as amostras de malha revestida com PANI, com concentração de 0,10 mol/L .....	68
Figura 21 – Condutividade elétrica após os ensaios de lavagem em diferentes ciclos, para as amostras de malha revestida com PANI, com concentração de 0,10 mol/L de ANI.....	69
Figura 22 – MEV das amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/ L de ANI, submetidas ao ensaio de lavagem com diferentes ciclos: (a, b, c) 5 ciclos, (c, d, e) 10 ciclos e (f, g, h) 15 ciclos. Ampliação de a)50x, b)500x e c)1.000x.....	70
Figura 23 – Condutividade elétrica das amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/ L de ANI, antes e após os ensaios de solidez ao suor.....	71
Figura 24 – MEV das amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/ L de ANI, submetidas ao ensaio de (a, b) suor alcalino e (c,d) suor ácido, ampliação de (a,c) 500x e (b,d)1000x.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Publicações entre o período de 2021-2025, com palavras-chaves “ <i>wearable</i> ” e “ <i>e-textile</i> ”.....	24
Tabela 2 – Títulos médios dos fios .....	41
Tabela 3 – Dados estruturais da malha <i>spacer</i> .....	41
Tabela 4 – Condutividade elétrica das amostras têxteis revestidas com polianilina, em diferentes concentrações do monômero.....	50
Tabela 5 – Concentração de 0,10 mol/L: Tensão e Deformação máxima da malha spacer antes (PES) e após a funcionalização (PES/PANI) .....	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Artigos selecionados com as palavras-chaves “wearable” and “textile” .....	24
Quadro 2 – Artigos selecionados com as palavras-chaves “e-textile” .....	27
Quadro 3 – Aplicações de malha spacer em diferentes setores .....	33
Quadro 4 – Exemplos de materiais condutores, semicondutores e isolantes .....	37
Quadro 5 – Vantagens e desvantagens dos polímeros condutores PPy, PANI e PEDOT .....	37
Quadro 6 - Estado de oxidação da polianilina .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANI	Anilina
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Cloreto de Ferro III Hexahidratado
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
MEV	Microscopia eletrônica de Varredura
PANI	Polianilina
PES	Poliéster
PEDOT	Poli(3,4-etilenodioxitiofeno)
PICs	Polímeros intrinsecamente condutores
PPy	Polipirrol
PS	Sensibilidade à pressão
TGA	Análise termogravimétrica
ZnO	Óxido de zinco
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido férrico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	19
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>21</b>
2.1	TÊXTEIS INTELIGENTES.....	21
<b>2.1.2</b>	<b>Têxteis eletrônicos</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Sensores vestíveis (wearables)</b> .....	<b>23</b>
2.2	TÊXTEIS ELETRÔNICOS VS. <i>WEARABLES</i> .....	23
2.3	MALHARIA.....	31
<b>2.3.1</b>	<b>Malhas <i>spacer</i></b> .....	<b>32</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Malhas de poliéster</b> .....	<b>34</b>
2.4	POLÍMEROS INTRINSECAMENTE CONDUTORES .....	36
<b>2.4.1</b>	<b>Polianilina</b> .....	<b>37</b>
2.5	PROPOSTA DE ESTUDO.....	39
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>41</b>
3.1	MATERIAIS .....	41
3.2	MÉTODOS.....	42
<b>3.2.1</b>	<b>Revestimento das malhas com polianilina</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Condutividade elétrica</b> .....	<b>43</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Microscopia eletrônica de varredura (mev)</b> .....	<b>44</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Ensaio eletromecânico</b> .....	<b>44</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Espectroscopia no infravermelho com transformada de fourier (ftir)</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Calorimetria diferencial de varredura (dsc)</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Análise termogravimétrica (tga)</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2.8</b>	<b>Resistência à tração</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2.9</b>	<b>Resistência à abrasão</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2.10</b>	<b>Solidez à lavagem</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2.11</b>	<b>Solidez ao suor</b> .....	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
4.1.	REVESTIMENTO DA MALHA <i>SPACER</i> COM POLIANILINA .....	48
4.2	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA .....	49

4.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	51
4.4	ELETROME CÂNICO.....	53
4.5	FTIR .....	58
4.6	DSC .....	60
4.7	TGA.....	61
4.8	RESISTÊNCIA À TRACÇÃO .....	62
4.9	RESISTÊNCIA À ABRASÃO.....	64
4.10	SOLIDEZ À LAVAGEM.....	68
4.11	SOLIDEZ AO SUOR.....	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, é crescente a busca por materiais têxteis inteligentes, que proporcionam aplicações e tecnologias inovadoras, como, por exemplo: proteção UV, agentes crômicos, propriedades antimicrobianas, entre outros, gerando um grande desafio no desenvolvimento de novos produtos (Shah *et al.*, 2022).

Os têxteis inteligentes podem ser definidos como materiais com capacidade de detectar mudanças no meio em que estão inseridos, exercendo uma função de resposta. São classificados como: passivos, ativos e superinteligentes. Estes podem ser aplicados em diversas áreas, como por exemplo, esporte, saúde, moda e uso militar. Dentro do segmento dos têxteis ativos encontram-se os têxteis eletrônicos, que estão sendo amplamente utilizados no desenvolvimento de *wearables* (Hassabo *et al.*, 2023) (Maestri *et al.*, 2023).

O mercado atual de *wearables* consiste predominantemente em dispositivos na forma de pulseiras e relógios, produzidos utilizando materiais a partir de microeletrônica, caracterizados pelo elevado rendimento no volume de produção (Komolafe *et al.*, 2021). É crescente a busca por materiais que atendam requisitos como elasticidade, respirabilidade e capacidade de serem lavados para a aplicação em *wearables*. Para atingir esses objetivos, uma ótima alternativa são os materiais têxteis (Chen *et al.*, 2023). A integração dos substratos fibrosos têxteis em dispositivos eletrônicos representa menos de 1 % do mercado global dos *wearables* e protótipos ainda se encontram na fase de pesquisa. Esse baixo percentual se dá pelos desafios de replicar a fabricação desses materiais em escala industrial e a dificuldade em obter materiais têxteis condutores de eletricidade (Komolafe *et al.*, 2021).

Os materiais têxteis apresentam características promissoras para uso em *wearables*, especialmente por funcionalidades como flexibilidade e conforto (Chen *et al.*, 2023). A escolha da matéria-prima, definição de processo, superfície têxtil, influenciam nas características dos materiais. Existem quatro diferentes classificações de superfícies têxteis: tecido plano, malhas, nãotecidos e entrançados. Cada estrutura apresenta propriedades físicas diferentes, decorrentes do seu método produtivo o que pode influenciar no desempenho do *wearable* (Sanches, 2022).

Especificamente tratando-se de malhas, são estruturas que apresentam flexibilidade e maleabilidade. A combinação dos diferentes tipos de laçadas define a aparência, resistência mecânica e a textura da malha. Destaca-se também que malhas não apresentam por si a propriedade de condução de eletricidade. A utilização de malhas apresenta como vantagem a versatilidade de estruturas para diversos tipos de aplicações, podendo ser utilizada em áreas convencionais ou em têxteis técnicos (Amaral, 2023). Dentro das diversas variações de

estruturas de malhas, existe a malha *spacer*, que apresenta propriedades muito interessantes, como excelente elasticidade, resistência à compressão, resistência ao impacto e permeabilidade ao ar, que são propriedades importantes para a sua aplicação em *wearables* (Lin, X. *et al.*, 2023)

Para o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos a partir de malhas, se faz necessário a utilização de um material condutor, para conferir condutividade elétrica ao substrato. Diferentes estratégias têm sido exploradas para funcionalizar substratos fibrosos, como revestimento com polímeros condutores e incorporação de nanopartículas (Dos Santos, 2023), conferindo-lhes propriedades elétricas adequadas para aplicações em dispositivos eletrônicos vestíveis.

Uma das abordagens mais recorrentes é o revestimento dos substratos têxteis com polímeros intrinsecamente condutores, como polianilina (PANI), polipirrol (PPy) e poli(3,4-etilenodioxitiofeno) (PEDOT). Polímeros intrinsecamente condutores passam a ter comportamento condutor elétrico, por meio de processos de oxidação, passando de isolantes para condutores. Esses materiais apresentam vantagens significativas em comparação com aditivos condutores convencionais, como cargas metálicas. Sua natureza de fácil síntese os torna particularmente indicados para aplicações em dispositivos eletrônicos e tecnologias vestíveis (*wearables*), nas quais essas características são essenciais. Adicionalmente, os polímeros condutores oferecem elevada resistência à corrosão e melhor compatibilidade com coeficientes de expansão térmica dos substratos poliméricos, favorecendo a estabilidade dimensional e o desempenho duradouro dos sistemas em diferentes condições operacionais (Mccord *et al.* 2025).

A PANI é um dos polímeros condutores mais estudados, destacando-se pela excelente condutividade elétrica, fácil síntese e elevada durabilidade em ambientes adversos. Além disso, apresenta como vantagens baixo custo, síntese simples, elevada condutividade elétrica e estabilidade (Wang, 2024). Sua capacidade de manter o desempenho elétrico mesmo sob umidade, variações térmicas e ação de agentes corrosivos a torna ideal para aplicações exigentes. A PANI amplamente utilizada em sensores e dispositivos de armazenamento de energia, como baterias e supercapacitores, onde contribui para maior eficiência. Essas propriedades consolidam a PANI como um excelente material na ciência de materiais e tecnologias modernas, com potencial crescente revelado por novas pesquisas (Shahid *et al.*, 2025).

Diversas técnicas têm sido empregadas na fabricação de têxteis à base de polímeros condutores, visando a incorporação eficiente de funcionalidades eletrônicas às fibras têxteis. Entre os métodos mais utilizados destacam-se: deposição química de vapor, polimerização

química *in situ*, polimerização eletroquímica, revestimento por imersão, revestimento por pulverização, eletrofiação, filtração a vácuo, síntese hidrotérmica e serigrafia (Shahid et al, 2025).

Dentre essas abordagens, a polimerização química *in situ* se sobressai como uma técnica simples para obtenção de malhas condutoras. Esse processo consiste na síntese direta do polímero condutor sobre a superfície têxtil, o que proporciona excelente aderência ao substrato e elevada uniformidade na distribuição da condutividade elétrica. Tal característica é essencial para o desempenho de dispositivos eletrônicos flexíveis, especialmente em aplicações que exigem integração com tecidos leves (Shahid *et al*, 2025).

Ressalta-se que a condutividade elétrica está diretamente relacionada a parâmetros críticos do processo de polimerização, como a concentração do monômero, a temperatura de reação, a atividade catalítica e as condições operacionais empregadas. A otimização desses fatores é essencial para garantir a formação de um revestimento uniforme e funcional, favorecendo o desempenho elétrico do material final (Shahid *et al*, 2025).

As malhas com propriedades condutoras representam uma evolução significativa em relação aos componentes tradicionais como fios metálicos e placas de circuito impresso rígidas, por oferecerem flexibilidade, conformabilidade e condutividade elétrica em substratos macios. O avanço das tecnologias de microeletrônica e comunicação sem fio tem permitido a incorporação de módulos inteligentes diretamente em malhas têxteis, resultando em sistemas vestíveis, adaptáveis e multifuncionais. Tais desenvolvimentos têm ampliado as aplicações dos sensores baseados em malhas condutoras para áreas como monitoramento de saúde, esporte, realidade virtual e setores estratégicos como o aeroespacial e o militar.

Portanto, essa dissertação de mestrado consiste no desenvolvimento de um material condutor pelo método de polimerização *in situ* com polianilina em uma malha *spacer* de poliéster, conciliando as propriedades de flexibilidade dos materiais têxteis junto com as propriedades condutoras da polianilina.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Obter um material condutor a partir do revestimento de polianilina em uma malha *spacer* para aplicação como têxtil inteligente.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência da concentração de anilina no meio reacional, na condutividade elétrica da malha *spacer*;
- Verificar a influência do revestimento de polianilina no comportamento mecânico das amostras;
- Estudar a influência de diferentes ciclos de abrasão e lavagem na estabilidade do revestimento e na condutividade elétrica do material;
- Estudar a variação da resistividade elétrica com a aplicação de tensão de compressão e avaliar se as malhas apresentam propriedades elétricas sensíveis à compressão que viabilizem a utilização em *wearables*.

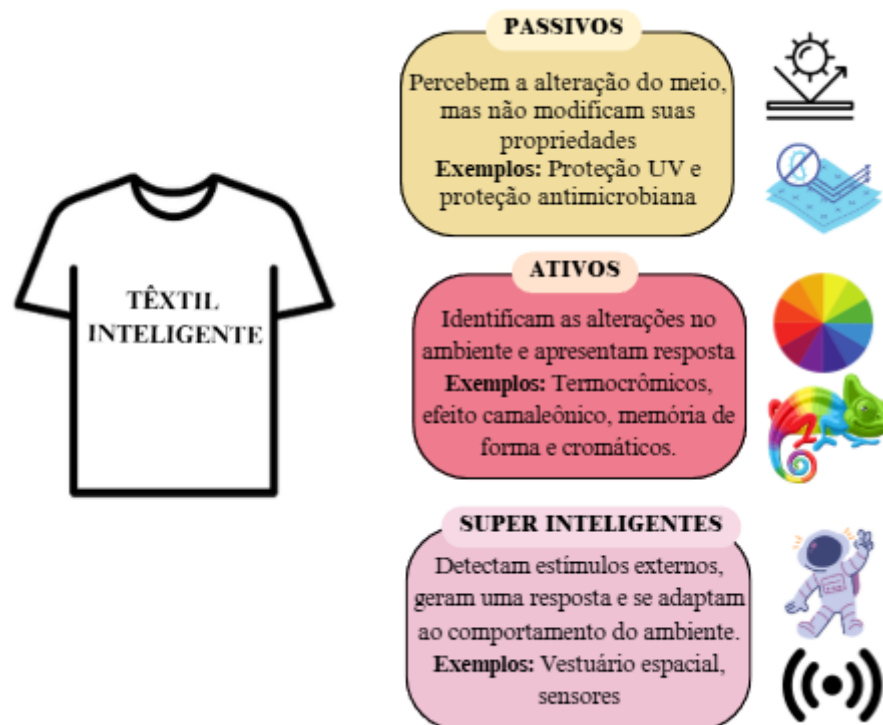
## 2 DESENVOLVIMENTO

Essa seção refere-se à fundamentação teórica da pesquisa. Serão abordados sobre têxteis inteligentes, têxteis eletrônicos, sensores vestíveis (*wearables*), têxteis eletrônicos vs. *wearables*, malharia, malhas *spacer*, malhas de poliéster, polímeros intrinsecamente condutores e polianilina.

### 2.1 TÊXTEIS INTELIGENTES

Os têxteis inteligentes consistem em materiais que apresentem ao menos uma função inteligente, podendo adaptar seu comportamento de acordo a estímulos externos ou mudanças no seu meio. São materiais classificados em três grupos: passivos, ativos e superinteligentes, conforme ilustrado na Figura 1 (Hassabo *et al.*, 2023) (Maestri *et al.*, 2023). Podem conter sensores que analisam diversos tipos de dados, como de pressão, temperatura, umidade etc. (Simegnaw *et al.*, 2021).

Figura 1 – Classificação de têxteis inteligentes.



Fonte: Autor (2025).

A primeira classificação, denominada como passiva, refere-se a materiais que percebem as mudanças do usuário ou do meio, mas não conseguem ajustar suas propriedades em resposta, uma vez que a funcionalidade do material existe de forma intrínseca, sem a necessidade de estímulos. Exemplos são tecidos com revestimento antimicrobiano com aplicação de nanopartículas de prata, vestuário de proteção UV, fibras condutoras e tecidos impermeáveis (Gauche *et al.*, 2020).

A segunda classificação refere-se aos ativos, que alteram suas propriedades ao detectarem mudanças e estímulos externos (Shah *et al.*, 2022). Um exemplo são os materiais cromáticos, como os termocrômicos, que alteram sua coloração quando expostos a variações de temperatura (Gauche *et al.*, 2020).

A terceira classificação, compreende os materiais superinteligentes, que, além de detectarem estímulos e reagirem a eles, apresentam a capacidade de se adaptar às condições externas. Exemplos incluem sensores, componentes com capacidade de armazenamento de energia e vestuário espacial (Shah *et al.*, 2022) (Gauche *et al.*, 2020).

O corpo humano é uma fonte abundante de energia biomecânica, gerada por movimentos como respiração, circulação sanguínea e o próprio ato de caminhar. Essas ações podem ser aproveitadas por substratos têxteis para alimentar dispositivos eletrônicos corporais de forma renovável e confortável. Diversos mecanismos de conversão, como os efeitos eletromagnético, eletrostático, triboelétrico e piezoelétrico, têm sido explorados, sendo os dois últimos os mais promissores para integração têxtil devido à sua leveza, flexibilidade e baixo custo. A combinação entre coletores de energia e estruturas têxteis oferece vantagens como sensibilidade à deformação e respirabilidade (Chen *et al.*, 2020).

### **2.1.2 Têxteis eletrônicos**

Os têxteis eletrônicos, também conhecidos pelo termo inglês “*e-textile*” (contração das palavras em inglês *eletronic* e *textile*), consistem na integração de dispositivos eletrônicos em vestuários têxteis técnicos. Esses materiais podem ser capazes de detectar, aquecer, iluminar e transmitir dados, criando funcionalidades tecnológicas para os substratos fibrosos (Choi *et al.*, 2022).

Oferecem soluções interessantes para aplicação em dispositivos eletrônicos, devido à sua versatilidade, possibilitada pela determinação da matéria-prima, processos de fabricação e acabamentos, que, conseqüentemente, alteram as propriedades do material, adaptando-o a diversas aplicações. A flexibilidade dos materiais têxteis pode proporcionar maior contato entre

a pele e os sensores, reduzindo a interferência nos parâmetros monitorados. Outra vantagem da utilização de materiais têxteis é a possibilidade de integrar vários sensores para monitorar diferentes partes do corpo/objeto em uma única peça, eliminando a utilização de dispositivos separados (Yang, 2025).

Além disso, têxteis eletrônicos proporcionam novas oportunidades de expansão para os *wearables* têxteis, ao integrar funcionalidades como monitoramento fisiológico e comunicação sem fio, ampliando significativamente as possibilidades de aplicação em áreas como saúde, esportes, segurança e moda interativa (Komolafe *et al.*, 2021).

### 2.1.3 Sensores vestíveis (*wearables*)

Os sensores vestíveis, conhecidos como *wearables*, consistem na integração de eletrônicos com acessórios, vestuário ou algum outro produto que seja vestível, podendo ser ou não a partir de um material têxtil (Komolafe, 2021). Em 2006, a tecnologia *wearable* foi lançada pela primeira vez em um dispositivo de medição de pressão arterial, pelas empresas Nike e Apple. Em 2013, surgiram outros *wearables* com diversas aplicações para diferentes áreas de monitoramento do corpo, como os *smartwatches*, braceletes, anéis, sapatos, palmilhas e óculos (Miao *et al.*, 2023). Em 2018, a empresa Fitbit desenvolveu um *wearable* para o monitoramento de contagem de passos, a distância percorrida e a intensidade das atividades.

Atualmente, é predominante no mercado a utilização de *wearables* usando processos e materiais de microeletrônica de elevado rendimento. Os *wearables* fabricados com materiais têxteis apresentam uma representatividade no mercado global de menos 1 %. A maior parte das pesquisas e desenvolvimentos da utilização de materiais têxteis integrados a dispositivos eletrônicos ainda se encontra na fase de protótipos, devido aos desafios relacionados à produção. A utilização de materiais têxteis é promissora, por ser um material flexível e confortável (Komolafe, 2021).

## 2.2 TÊXTEIS ELETRÔNICOS VS. *WEARABLES*

Verifica-se na literatura a utilização dos dois termos: *e-textile* e *wearable*. Entretanto, percebe-se que não existe uma definição clara que distinga a utilização de cada um. Com o intuito de compreender como os termos vêm sendo utilizados na literatura científica, na base de dados Scopus verificou-se as combinações das seguintes palavras-chaves com o operador

booleano AND: “wearable” AND “textile”; “e-textile”. O parâmetro de pesquisa foi a utilização das palavras-chaves supracitadas no título dos artigos. Na Tabela 1 é possível verificar o número de publicações durante o período de 2021 até julho de 2025. Verifica-se que existe um crescente interesse por publicações com esses termos.

Tabela 1 – Publicações entre o período de 2021-2025, com palavras-chaves “wearable” e “e-textile”.

Palavras-chaves	Número de Publicações				
	2021	2022	2023	2024	Até julho de 2025
“wearable” AND “textile”	184	148	161	184	89
“e-textile”	69	61	84	99	38

Fonte: Autor (2025).

Para compreender a relação das palavras utilizadas na busca com os objetivos das pesquisas dos artigos, foram selecionados 3 artigos publicados para cada ano (2021, 2022, 2023 2024 e 2025), utilizando como critério de seleção os artigos mais citados. A partir disso os artigos que apresentavam o desenvolvimento de algum produto foram selecionados. A pesquisa foi dividida em duas partes: “wearable” AND “textile” (Quadro 1) e “e-textile” (Quadro 2). Também foi realizada uma busca utilizando o termo “spacer” em combinação com os demais, porém não foram encontrados artigos com essas palavras-chaves na base Scopus.

Quadro 1 – Artigos selecionados com as palavras-chaves “wearable” and “textile”.

Ano	Autores	Objetivo(s) do artigo
2021	ANWER, S. <i>et al.</i>	Sensores vestíveis baseados em têxteis para monitorar a fadiga física
	DI TOCCO, J. D. <i>et al.</i>	Tecido condutor para monitorar flexão/extensão do joelho
	NIKOLOVA, E. <i>et al.</i>	Roupa infantil para o monitoramento cardíaco
2022	He, W. <i>et al.</i>	Tecido gerador de energia movido a umidade
	ZHAO, Z. <i>et al.</i>	Patch lavável com nanofios de ouro para monitoramento de parâmetros de saúde

Ano	Autores	Objetivo(s) do artigo
	CHOI, S. <i>et al.</i>	Tecido com OLED azul para dispositivo médico de fototerapia
2023	PAN, H. <i>et al.</i>	Têxteis piezoresistivos biodegradáveis à base de fibras de algodão para biomonitoramento vestível
	GALLI, V. <i>et al.</i>	Calça que detecta movimento e transmite os dados em tempo real
	CHOUDHRY, N. <i>et al.</i>	Tecido com sensor de pressão com fio condutor
2024	KONG, Yue <i>et al.</i>	Tecido de algodão retardante de chamas com hidrofobicidade e condutividade elétrica para têxteis inteligentes vestíveis com sistema de alarme de incêndio
	ZHANG, Y. <i>et al.</i>	Têxtil eletrônico eletroluminescente com alto brilho
	TANG, C. <i>et al.</i>	Sensor de tensão têxtil ultrasensíveis para codificação da fala, por meio dos movimentos da garganta
2025	MIAN, H. <i>et al.</i>	Sensor de micro-ondas vestível incorporado em tecido para o monitoramento não invasivo da glicose no suor
	YANG, Y. <i>et al.</i>	Sensores de pressão resistivos têxteis bordados à máquina, para integração em sistemas vestíveis inteligentes
	AMINI, S. <i>et al.</i>	Nanogerador triboelétrico têxtil dopado com polianilina

Fonte: Autor (2025).

Os estudos selecionados para 2021 foram os seguintes: Anwer *et al.* (2021) pesquisaram sobre sensores vestíveis para monitorar a fadiga física durante exercícios de flexão, por meio de parâmetros fisiológicos: frequência cardíaca e respiratória e temperatura de pele. Os ensaios foram realizados com a aplicação de sensores em um colete. Di Tocco *et al.* (2021) explicaram a importância dos *wearables* para monitorar o corpo humano, principalmente o joelho, que é responsável por suportar massa corporal. No estudo foi testado um sensor incorporado em uma joelheira para verificar a tensão de flexão do joelho. Os resultados mostraram que o produto foi capaz de detectar os movimentos e o número de repetições. Nikolova *et al.* (2021) desenvolveram um vestuário infantil com sistema de monitoramento cardíaco sendo que os requisitos básicos desse produto são garantir a mobilidade da criança, conforto, permeabilidade a umidade e elasticidade.

Os artigos selecionados para 2022: He, W *et al.* (2022) desenvolveram uma máscara de tecido de malha para o monitoramento da respiração humana. Para isso, foi utilizado o método de serigrafia para a impressão de matrizes de eletrodos no tecido. Zhao, Z. *et al.* (2022) desenvolveram um sensor piezoresistivo flexível em tecido que pode ser utilizado como *patch*, ou seja, consiste em detalhes a partir de materiais têxteis que podem ser incorporados ao vestuário. O tecido *patch* desenvolvido configura-se em uma estrutura sanduiche, composta pela camada central impregnada com ouro, e os tecido externos de poliamida, serigrafados com uma tinta prateada com um par de eletrodos flexível. Choi, S. *et al.* (2022) desenvolveram um dispositivo médico de fototerapia usando um diodo orgânico emissor de luz (OLED) azul em um tecido para tratar icterícia neonatal, que é uma doença comum em recém-nascidos. Atualmente, o tratamento dessa doença ocorre por meio da utilização de uma incubadora, onde o bebê fica exposto à luz de LEDs, ocorrendo a desvantagem de a luz não incidir nas costas do recém-nascido. Sendo assim, esse estudo corrige esse problema, por ficar em contato com as costas da criança também. O objetivo é utilizar o tecido desenvolvido para a confecção de roupas de bebês.

Quanto aos artigos definidos para 2023: Pan, H. *et al.* (2023) utilizaram como matéria-prima algodão para o desenvolvimento de um têxtil eletrônico, com o objetivo de detectar sinais fisiológicos. Galli, V. *et al.* (2023) desenvolveram uma calça inteligente através de um sensor que monitora os seguintes movimentos do corpo: flexões do joelho, agachamento e atividades como subir escada. Choudhry, N. *et al.* (2023) sugeriram em sua pesquisa uma nova técnica para fabricar sensores de pressão, utilizando a técnica de costura, usando fios e tecido condutor revestido com nanoplaquetas metálicas e grafeno.

Em 2024, Kong, Y. *et al.* desenvolveram um têxtil inteligente multifuncional, capaz de reunir propriedades como retardância à chama, condutividade elétrica e hidrofobicidade em um único substrato: o tecido de algodão. A modificação do material foi realizada por meio de uma reação entre o ácido aminotrimetilfosfônico e a alantoína, aplicada ao algodão através de um método de impregnação. Zhang, Y. *et al.* (2024) criaram um dispositivo eletroluminescente flexível de corrente alternada, integrado a substratos têxteis. A proposta envolveu a fabricação de camadas funcionais sobre tecidos, com materiais capazes de emitir luz sob ação de corrente elétrica alternada, visando aplicação na área da moda a partir de interfaces interativas e sistemas de iluminação portáteis. Tang, C. *et al.* (2024) propuseram um mecanismo de detecção de deformação de elevada precisão e velocidade de codificação, em um tecido embutido em uma

gargantilha de pescoço, com o objetivo de capturar os movimentos da garganta para a decodificação da fala, como solução para cenários onde a comunicação verbal é dificultada.

No ano de 2025, Mian, H. *et al.* (2025) desenvolveram um sistema inovador de monitoramento contínuo de glicose, sem necessidade de coleta de sangue, com foco em conforto e praticidade para pacientes diabéticos. A solução proposta consiste em um sensor de micro-ondas vestível, integrado a tecidos, capaz de detectar níveis de glicose por meio da análise do suor em tempo real. A abordagem não invasiva visa contribuir com avanços significativos na área de saúde digital e dispositivos biomédicos. Yang, Y. *et al.* (2025) propuseram um método acessível e versátil para fabricar sensores de pressão têxteis via bordado à máquina. Foram criadas duas configurações funcionais, destacando elevada velocidade de resposta e integração com inteligência artificial. Os sensores demonstraram eficácia em aplicações como monitoramento muscular, revelando o potencial de tecnologias vestíveis inteligentes e escaláveis. Amini S. *et al.* (2025). desenvolveram um nanogerador triboelétrico têxtil flexível dopado com polianilina, capaz de converter vibrações mecânicas de baixa frequência em eletricidade. Utilizando cinco tipos de tecidos, PVC e eletrodos de alumínio, o dispositivo demonstrou eficiência, durabilidade e aplicação prática em eletrônicos vestíveis. Seu desempenho destaca o potencial da tecnologia para coleta energética sustentável e sensores autoalimentados.

O Quadro 2 mostra os artigos selecionados segundo o critério definido que utilizaram a palavra *e-textile* no título do artigo.

Quadro 2 – Artigos selecionados com a palavra-chave “*e-textile*”.

Ano	Autores	Objetivo(s) do artigo
2021	SOFRONOVA, D. <i>et al.</i>	Tapete para garantir o conforto de pessoas acamadas
	CAYA, V. <i>et al.</i>	Têxtil eletrônico para aplicação em termoterapia
	WANG, Y. <i>et al.</i>	Tecido com base de nanocompósitos de polianilina para dispositivo multifuncional
2022	QI, X <i>et al.</i>	Têxtil eletrônico para detecção de deformações e aquecimento subaquáticos
	XU, R. <i>et al.</i>	Tecido eletrônico em configuração <i>kirigami</i> com sensor de toque/tensão

Ano	Autores	Objetivo(s) do artigo
	TIAN, B. <i>et al.</i>	Têxtil eletrônico para monitorar os movimentos humanos e gerenciar a temperatura corporal.
2023	HE, H. <i>et al.</i>	Têxtil eletrônico com detecção de temperatura em vestuário de combate a incêndio
	ZENG, X. <i>et al.</i>	Têxtil eletrônico para reconhecimento de gestos
	RAVICHANDRAN, V. <i>et al.</i>	Luvas equipadas por sensores para a avaliação da doença de <i>Parkinson</i>
2024	PENG, Y. <i>et al.</i>	Têxtil eletrônico que fornece resfriamento durante o dia e monitoramento de sinais bioelétricos humanos
	YAN, J. <i>et al.</i>	Fios triboelétricos de nanofibras para coleta eficiente de energia em têxteis eletrônicos de combate a incêndios
	MARTINS, J. <i>et al.</i>	Integração de sensores em um colete têxtil para monitorar a postura frontal
2025	LEE C. <i>et al.</i>	Têxteis eletrônicos para aquecimento
	MOTIEPOR, K. <i>et al.</i>	Touca de EGG para aplicações de neuroimagem
	WIEDERHOLD, A. e GUNDLER, C.	Boné sensorizado com foco no monitoramento discreto da hipomimia

Fonte: Autor (2025).

Para o ano de 2021: Sofronova, D. *et al.* (2021) projetaram um tapete com substrato têxtil e sensores para monitorar a posição do corpo e prevenir úlceras de pressão em pessoas acamadas. Caya, M. V. *et al.* (2021) utilizaram um fio condutor como elemento para aquecimento em sessões de termoterapia para aplicação de calor em partes definidas do corpo, com o objetivo de aliviar dores. Wang, Y. *et al.* (2021) utilizaram nanocompósitos de polianilina em um dispositivo eletrônico que combina diversas propriedades de detecção, armazenamento de energia, blindagem eletromagnética e retardância à chama.

Sobre os artigos selecionados para 2022: Qi, X. *et al.* (2022) utilizaram uma fibra condutora à base de metal líquido para detectar movimento e prevenção de hipotermia em luvas subaquáticas. Xu, R. *et al.* (2022) relataram que para sua pesquisa utilizaram um hidrogel iônico em forma de *kirigami* (tecnologia que originou na China e dá origem a estruturas

tridimensionais) juntamente com um tecido de seda. A partir da combinação desses substratos foi desenvolvido um teclado de computador para a detecção do toque e foi desenvolvida uma manga com esse mesmo tecido com capacidade de comunicação com jogos. Tian, B. *et al.* (2022) utilizaram o método de serigrafia para aplicar uma tinta condutora na superfície de um tecido, com objetivo de utilizar esse material têxtil para detectar os movimentos do corpo e para aquecimento.

Quanto os artigos selecionados para 2023: He, H. *et al.* (2023) desenvolveram um têxtil eletrônico para alerta de incêndio com fibras termoelétricas de aerogel usadas para proteção de vestuário de combate ao incêndio. O sistema consiste em avisar quando a temperatura da superfície do vestuário se aproxima a sua temperatura de decomposição. Zeng, X. *et al.* (2023) integraram cinco sensores em uma luva à base de carbono com o objetivo de desenvolver um têxtil eletrônico capaz de detectar 8 gestos de movimentos diferentes. Ravichandran, V. *et al.* (2023) apresentaram em sua pesquisa uma luva que utiliza sensores para detecção dos movimentos da mão, com a intenção de facilitar os exames de diagnóstico da doença de *Parkinson*.

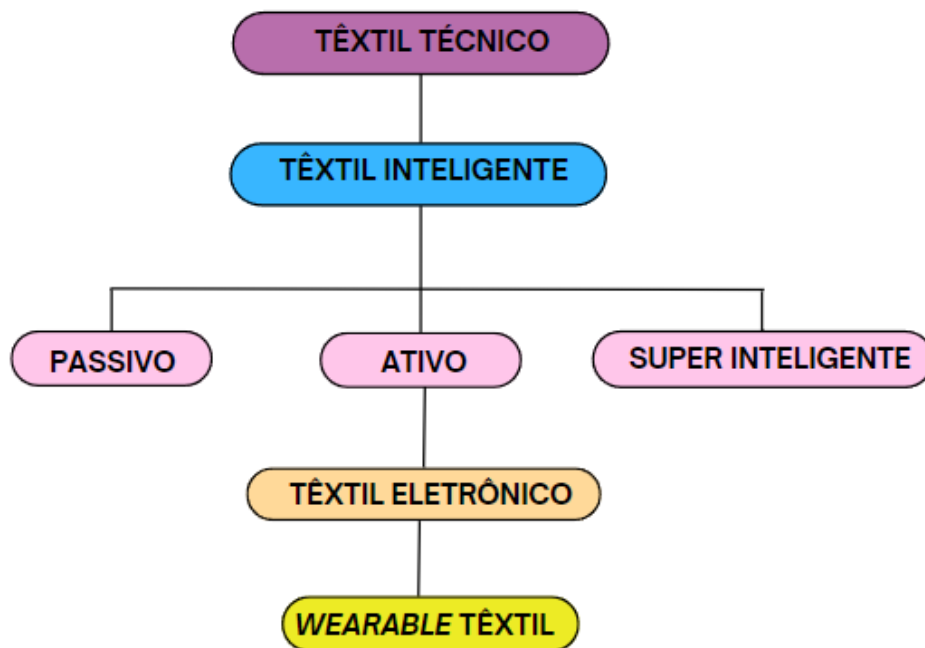
Em 2024, Peng, Y. *et al.* desenvolveram um e-têxtil com elevada permeabilidade ao ar e elástico, capaz de fornecer resfriamento passivo e monitorar sinais bioelétricos humanos com precisão. Utilizando micropartículas de  $Al_2O_3$  e estruturas micro e nanoporosas, o tecido apresenta alta emissividade térmica e refletividade solar. O produto apresentou um desempenho de resfriamento notável de 15 °C sob a luz do dia e 8 °C à noite. Yan J. *et al.* (2024) desenvolveram fios de nanofibras de poliamida com uma camada intermediária de MXene para criar têxteis de elevado desempenho. Os dispositivos foram integrados a uniformes de bombeiros, permitindo monitoramento em tempo real da atividade e localização em situações de incêndio. Com resistência a elevadas temperaturas (até 400 °C) e excelente captação de carga, o sistema melhora significativamente a segurança e eficiência operacional dos bombeiros. Martins, J. *et al.* (2024) desenvolveram um dispositivo vestível para monitoramento contínuo da postura, focando na postura anterior da cabeça. O sistema combina sensores de eletromiografia cervical com dados inerciais, integrados por e-têxteis com trilhas condutoras.

Em 2025, Lee C. *et al.* criaram uma jaqueta inteligente termocrômica com elevada flexibilidade e controle térmico personalizado. O sistema adapta-se a diferentes perfis de usuário, exibe mudanças de cor visuais conforme a alteração da temperatura e possui controle inteligente de temperatura. MOTIEPOR, K. *et al.* (2025) projetaram uma touca de Eletroencefalograma (EEG) flexível e com fios condutores, visando obter conforto e a praticidade em monitoramentos prolongados. O projeto busca oferecer qualidade de sinal

eletrofisiológico a partir de uma estrutura de baixa gramatura, ergonômica e livre de fios externos, promovendo maior usabilidade em aplicações clínicas e cotidianas. WIEDERHOLD, A. e GUNDLER, C. desenvolveram um boné sensorizado com foco no monitoramento discreto da hipomimia, uma característica comum em pacientes com distúrbios neurológicos, como Parkinson. A inovação permite que o próprio paciente acompanhe seus dados de forma autônoma, o que facilita a autoavaliação e fortalece a relação com o tratamento.

Mediante a análise dos artigos, é possível verificar que os dois termos, *wearables* e *e-textiles* são utilizados para os mesmos tipos de aplicações. Entretanto, a partir dos artigos selecionados, percebe-se que o termo *wearable* é utilizado para as aplicações que de alguma forma podem ser “vestidas” pelo utilizador e estão relacionadas ao monitoramento das condições humanas. Enquanto os *e-textiles* englobam todos os materiais têxteis eletrônicos, podendo ser ou não intrinsecamente aplicações vestíveis. Conforme demonstrado na Figura 2, considera-se que o termo *wearable* têxtil é subclassificação dos têxteis eletrônicos.

Figura 2 – Classificação dos têxteis técnicos.



Fonte: Autor (2025).

Como foi possível observar, os têxteis eletrônicos vêm despertando um interesse crescente, impulsionando pesquisas e o desenvolvimento de novos produtos. Nesse cenário, a malharia como uma tecnologia estratégica, oferecendo versatilidade na construção de estruturas

tridimensionais que permitem a integração de componentes eletrônicos de forma confortável, respirável e adaptável ao corpo humano.

Essa capacidade de criar superfícies flexíveis e funcionais posiciona a malharia como um elemento-chave para a evolução dos tecidos inteligentes, abrindo caminho para soluções inovadoras em saúde, esportes e moda. A seguir, será explorado como a tecnologia de malharia tem se reinventado para atender às exigências desse mercado emergente e altamente tecnológico.

### 2.3 MALHARIA

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT, 2023), o Brasil apresenta a maior cadeia têxtil completa do Ocidente e está entre os quatro maiores produtores de malhas do mundo. A malha é uma estrutura têxtil formada pelo entrelaçamento de fios, que formam as laçadas. Pode ser classificada como malharia por trama e por urdume. Na malharia por trama, as laçadas são produzidas na direção horizontal por intermédio de teares circulares ou retilíneos. Na malharia por urdume as laçadas são formadas na direção vertical a partir de teares unicamente retilíneos (Jiang *et al.*, 2021).

Nos teares retilíneos de malharia por trama, as agulhas permanecem paradas enquanto o alimentador se movimenta e transporta o fio em movimento de vai e vem. Nos teares circulares, as agulhas rotacionam ao redor do cilindro, e os alimentadores encontram-se fixos, sendo que todas as agulhas podem ser alimentadas por um mesmo fio (Andrade, 2022). As principais estruturas da malharia por trama são: *jersey* (meia-malha), *rib* (canelado ou ribana), *interlock* e *purl* (ponto esquerdo) (Ferreira *et al.*, 2022).

A malharia por urdume divide-se em dois principais grupos: *Ketten* e *Raschel*, ou seja, de acordo com o tipo de tear utilizado. Os teares *Ketten* produzem estruturas mais simples, e o tecido, ao sair do tear, encontra-se em um ângulo de 90° em relação à barra de passadores. Com os teares *Raschel* é possível obter uma variedade maior de estruturas de malhas. Além disso, a malha, ao sair do tear, está a um ângulo entre 120° e 160° em relação à barra de passadores. Algumas estruturas de malharia por urdume são: *tricot*, *franse*, *tuch*, *satim*, *samt* e *atlas* (Ferreira *et al.*, 2022).

As malhas produzidas pelos teares de malharia por trama são amplamente utilizadas no vestuário convencional e técnico, como por exemplo: blusas, moletons, pijamas, meias, punhos, golas, roupas médicas e meias de compressão. As malhas produzidas pelos teares de malharia

por urdume são utilizados em roupas íntimas, blusas, rendas, sacos de frutas, mosquiteiros, tênis, toucas de natação, entre outros (Ferreira *et al.*, 2022).

As malhas utilizadas em aplicações técnicas, especialmente as classificadas como malhas funcionais, são desenvolvidas para atender a demandas específicas de desempenho, como conforto térmico, flexibilidade e suporte estrutural. Um exemplo é o trabalho de Dadjou, M. *et al.* (2024), que utilizou malhas para incorporar eletrodos capazes de monitorar e registrar sinais fisiológicos, ressaltando a importância da escolha adequada da estrutura de malha, especialmente pela sua capacidade de interagir com a pele e se moldar às curvas naturais do corpo.

Um destaque dentro da categoria de malhas com aplicações técnicas é a malha *spacer*, que se mostra uma excelente escolha para aplicações em têxteis eletrônicos. Sua estrutura tridimensional proporciona circulação de ar, resiliência e estabilidade dimensional, características essenciais para dispositivos vestíveis e sistemas de monitoramento corporal. Além disso, sua versatilidade de produção, em tear Raschel ou tear de malharia por trama (circular ou retilínea), permite adaptações criativas e personalizadas em projetos inovadores, como sensores integrados a tecidos.

### 2.3.1 Malhas *spacer*

A malha *spacer* é constituída por duas camadas superficiais, superior e inferior, e fios que ligam estas camadas, formando uma estrutura tridimensional, como pode ser verificado na Figura 3 (Lin, X. *et al.*, 2023). Pode ser produzida em teares de malharia por urdume ou por trama (Yip, 2008). Devido à singularidade da sua configuração, caracterizada pelo espaçamento entre as duas camadas, a malha apresenta excelente elasticidade, resistência à compressão e ao impacto, além de excelente permeabilidade ao ar e umidade (Lin, X. *et al.*, 2023).

Figura 3 – Esquema ilustrativo de uma malha *spacer*.



Fonte: Autor (2025).

A utilização do fio de ligação entre as duas camadas confere ao material uma elevada capacidade de resiliência após ser submetido à compressão, podendo ser um substituto, por exemplo, para as espumas de poliuretano. É possível verificar no Quadro 3, que malhas com estrutura *spacer* possuem ampla aplicação em diversas áreas (Dejene *et al.*, 2024).

Quadro 3 – Aplicações de malha *spacer* em diferentes setores.

Setores	Exemplos de aplicação
Automotivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capas para assento de carro</li> <li>- Interiores automotivos</li> <li>- Sistema de aquecimento de assentos para carros</li> </ul>
Vestuário	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Palmilhas</li> <li>- Sutiãs</li> <li>- Tecidos reguladores de calor e umidade</li> <li>- <i>Wearables</i> de pressão e temperatura vestível</li> </ul>
Lar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Colchões/capa de colchões</li> <li>- Almofadas</li> </ul>
Esporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vestuário esportivo</li> <li>- Equipamentos esportivos</li> </ul>
Engenharia Civil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geotêxteis</li> <li>- Filtros de fluidos</li> <li>- Compósitos</li> </ul>

Fonte: Adaptado de (Ray *et al.*, 2012), (Li *et al.*, 2020) e (Zhang *et al.*, 2020)

A presença da camada espaçadora é o que confere às malhas *spacer* suas principais características: elevada compressibilidade, excelente recuperação após pressão e capacidade de distribuir forças de maneira eficiente. Tais propriedades são influenciadas por diversos parâmetros estruturais, como o tipo de fio usado, seu diâmetro, ângulo de inclinação do fio de ligação, densidade e raporte de disposição. Monofilamento utilizado como fio de ligação e com maior inclinação, por exemplo, oferece maior resistência à compressão, enquanto fios multifilamentares proporcionam mais flexibilidade (Tekmedash, M. I, 2025).

Além disso, fatores como a adição de materiais elásticos (como elastano), no raporte das camadas externas e o espaçamento entre as camadas também desempenham papel essencial no desempenho mecânico das malhas *spacers*. Estudos apontam que ajustes nesses elementos

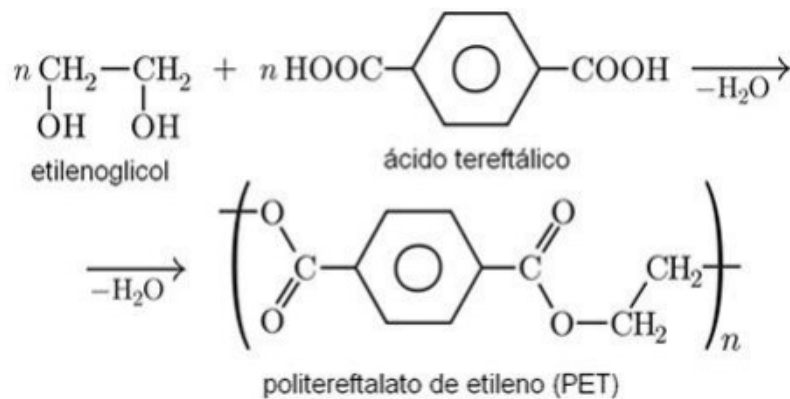
podem ampliar a capacidade de amortecimento, resistência à carga cíclica e comportamento de recuperação do tecido após múltiplas compressões (Tekmedash, M. I, 2025).

Entre as principais vantagens das malhas *spacer* estão a eficácia no amortecimento ao impacto, conforto térmico proporcionado pela estrutura porosa e a possibilidade de personalização conforme a aplicação desejada. Outra vantagem, está na ampla faixa de espessuras disponíveis, que pode variar de 2 mm a 64 mm, tornando-se uma opção versátil para diversas aplicações (Dejene *et al.*, 2024). Essas características tornam esse tipo de malha ideal para uma ampla gama de usos, como roupas esportivas, equipamentos ortopédicos, móveis, compósitos, etc. (Tekmedash, M. I, 2025).

### 2.3.2 Malhas de poliéster

O polímero poliéster, é obtido por meio de reação de síntese entre um ácido carboxílico (ácido tereftálico) e um glicol (etileno glicol) (Figura 4) (Lima, 2020). O poliéster é um polímero semicristalino, composto por regiões amorfas e cristalinas, com um teor de cristalinidade próximo a 50%. Sua temperatura de transição vítrea varia entre 80 °C e 90 °C (Andrade, 2018).

Figura 4 – Reação química de formação do poliéster.



Fonte: MENEZES, 2018.

O poliéster possui excelentes propriedades mecânicas e térmicas, além de ser caracterizado por seu baixo custo de produção, boa resistência à luz, rápida secagem, elevada resistência ao desgaste e excelente estabilidade dimensional (Conti, 2021). É parcialmente hidrofóbico e apresenta elevada resistência aos ácidos diluídos, como por exemplo, o ácido clorídrico (HCl). Além disso, o poliéster destaca-se por sua ótima resistência à radiação ultravioleta e a ataques microbiológicos (Immich *et al.*, 2022).

O poliéster é fundido em altas temperaturas, extrudado por meio de uma fiação e submetido ao fluxo de ar frio para sua solidificação. Os filamentos formados passam por um processo de estiragem, responsável por orientar as cadeias poliméricas, conferindo ao material propriedades de resistência à tração, tornando o fio adequado para passar pelos processos subsequentes, que podem ser por exemplo, a malharia (Carvalho, 2011).

É amplamente utilizado em diversas aplicações, como: camisas, calças, cortinas, não tecidos para isolamento térmico e acústico, enchimentos para edredons, filtros, forros, entre outras aplicações (Carvalho, 2011). Sua versatilidade é notável, e com o desenvolvimento das microfibras, que conferem ao material um toque mais suave e melhor absorção de umidade, tornando sua utilização ainda mais abrangente (Menezes, 2018).

Devido a versatilidade do uso do poliéster, existe o interesse em desenvolver têxteis eletrônicos com essa matéria-prima. Caballero-Callero, O. (2024) desenvolveu um dispositivo termoelétrico projetado para coletar o calor humano utilizando materiais termoelétricos  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  e  $\text{Te}$  incorporados em um substrato de poliéster. A escolha do poliéster foi baseada em sua ampla aplicação no vestuário cotidiano, o que facilita sua integração com dispositivos vestíveis de forma funcional. Além de oferecer flexibilidade e conforto, o poliéster comercialmente disponível se mostrou compatível com processos de eletrodeposição. Essa compatibilidade viabiliza a criação de sistemas híbridos altamente escaláveis e econômicos, capazes de captar o calor corporal para gerar energia, dispensando o uso de baterias tradicionais. Em resumo, o uso do poliéster combina viabilidade técnica, potencial comercial e eficiência energética, sendo uma plataforma ideal para o desenvolvimento de malhas inteligentes voltadas à coleta de energia e ao acionamento de sensores em aplicações vestíveis.

Camlibel, N. *et al.* (2025) projetaram um conjunto de sensores de pressão utilizando mecanismo piezoresistivo, utilizando malha de algodão e malha de poliéster, costurado entre duas camadas de não tecido de polipropileno bordados com fio de aço inoxidável. As malhas foram submetidas a uma série de modificação da superfície: revestimento com nanopartículas de prata, formação de um filme de xerogel de sílica por meio de um processo sol-gel, aplicação de polipirrol por polimerização oxidativa química, e deposição de uma camada de nanotubos de carbono e polidimetil siloxano por meio de um método de revestimento por imersão.

Apesar de sua ampla utilização em peças de vestuário, as malhas convencionais são geralmente materiais isolantes, o que limita sua aplicação direta em dispositivos eletrônicos vestíveis. Para que essas estruturas têxteis possam atuar como suporte funcional de sensores, baterias e elementos de coleta de energia, é essencial que apresentem propriedades de condução elétrica para aplicação em *wearables*. Esse desafio é superado pela incorporação de materiais

condutores à malha, formando redes eletricamente ativas sem comprometer sua flexibilidade e respirabilidade (Shao, Y., 2023).

Dentre os principais agentes condutores utilizados estão nanopartículas metálicas, nanofios, polímeros condutores como polianilina, além dos materiais como nanotubos de carbono e nanofolhas de grafeno. Com isso, é possível o desenvolvimento de malhas têxteis em plataformas inteligentes e multifuncionais para aplicações como sensores de movimento, controle térmico corporal e monitoramento fisiológico (Shao, Y., 2023).

## 2.4 POLÍMEROS INTRINSECAMENTE CONDUTORES

A seleção de materiais condutores é muito importante no desenvolvimento de um têxtil eletrônico (*e-textile*). Ao longo dos anos, diversos materiais foram utilizados, como o grafeno, nanotubos de carbono, polímeros condutores, materiais metálicos, entre outros (Sun *et al.*, 2022). Os polímeros intrinsecamente condutores (PICs) combinam as propriedades químicas e físicas dos polímeros convencionais, mas apresentam propriedades adicionais, como elétricas, óticas e magnéticas (Ouyang, J. 2018). Existe um grande interesse nesses materiais devido a seu custo mais baixo de aquisição em relação ao polipirrol, condutividade elétrica ajustável (depende do grau de dopagem e da concentração) e facilidade de síntese (Grancarić *et al.*, 2019).

A condutividade elétrica em PICs está diretamente relacionada à presença de ligações duplas conjugadas ao longo da cadeia polimérica, que permitem a deslocalização dos elétrons  $\pi$ . Essa estrutura eletrônica favorece a mobilidade dos portadores de carga, reduzindo a lacuna de energia entre o orbital molecular ocupado mais alto (HOMO) e o orbital molecular desocupado mais baixo (LUMO). Em sistemas poliméricos conjugados, essa deslocalização eletrônica transforma o material de um isolante para um semicondutor. Para alcançar valores de condutividade ainda maiores, é necessário aplicar o processo de dopagem, que consiste na introdução de agentes oxidantes ou redutores capazes de gerar portadores de carga adicionais, como polarons e bipolarons, intensificando a condução elétrica ao diminuir ainda mais a diferença energética entre as bandas de valência e condução (PODDAR *et al.*, 2021).

No Quadro 4 é possível observar que os materiais que apresentam melhor condutividade elétrica são os metais, como prata, cobre e ouro, porém possuem desvantagens, especialmente relacionadas a rigidez e elevada densidade que restringem o seu uso em diversas aplicações. Porém, os polímeros condutores, como a polianilina, apesar de possuírem menor condutividade elétrica, são mais leves (Oliveira, 2015).

Quadro 4 – Exemplos de materiais condutores, semicondutores e isolantes.

<b>Classificação</b>	<b>≈ Condutividade (S/cm)</b>	<b>Materiais</b>
Condutor	$1 \times 10^8$	Prata, cobre e ouro
	$1 \times 10^6$	Poliacetileno dopado (AsFs)
	$1 \times 10^4$	Grafite e chumbo
	$1 \times 10^2$	Polianilina, PEDOT e polipirrol dopado
Semicondutor	$1 \times 10^{-2}$	Germânio (elevada pureza)
	$1 \times 10^{-6}$	Polianilina não dopada
Isolante	$1 \times 10^{-12}$	Sulfato de cádmio e óxido de alumínio
	$1 \times 10^{-15}$	Poliamida, polietileno, polipropileno e enxofre
	$1 \times 10^{-18}$	Poliéster, borracha, diamante, poliamida e quartzo

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2015.

Substratos têxteis convencionais são materiais isolantes, como exemplo, aqueles constituídos de poliéster. Para transformá-los em um material condutor é necessário combiná-los com outro material. Geralmente, a incorporação de partículas metálicas aumenta a densidade do material. Por esse motivo, uma ótima opção é a utilização de polímeros condutores (Abilevitch *et al.*, 2023). Os polímeros condutores que se destacam são: polianilina (PANI), polipirrol (PPy) e o poli(3,4-etilenodioxitiofeno) (PEDOT).

Quadro 5 – Vantagens e desvantagens dos polímeros condutores PPy, PANI e PEDOT.

<b>Polímero</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
PPy	- Elevada condutividade; - Fácil preparação e modificação da superfície;	- Rígido e quebradiço; - Insolúvel;
PANI	- Diversas formas estruturais; - Baixo custo;	- Não biodegradável; - Solubilidade limitada;
PEDOT	- Conductor com coloração transparente; - Ambiental e eletroquimicamente estável.	- Solubilidade limitada.

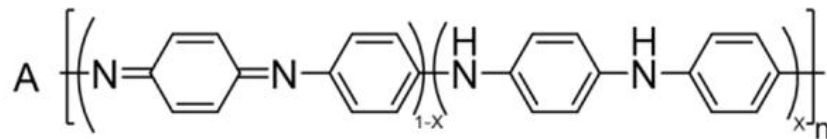
Fonte: Adaptado de GRANCARIĆ *et al.*, 2019.

### 2.4.1 Polianilina

A PANI é um polímero intrinsecamente condutor interessante para aplicação em materiais têxteis, devido à estabilidade ambiental e matéria-prima de baixo custo (Abilevitch, 2023). A estrutura química da polianilina é demonstrada na Figura 5.

Na síntese química da PANI podem ser utilizados alguns ácidos, como: ácido clorídrico, ácido sulfúrico, ácido fosfórico e ácido perclórico. O processo de dopagem pode ser realizado por vários processos, os mais utilizados são os químicos e eletroquímicos. A dopagem ocorre com a ação de um agente oxidante sobre o monômero da anilina, em meio líquido ácido. Alguns exemplos de agentes oxidantes: persulfato de amônio, dióxido de manganês, peróxido de hidrogênio, Cloreto de Ferro III Hexahidratado, dicromato de potássio e clorato de potássio (Veronezi, 2014). Os principais parâmetros que influenciam na polimerização são: temperatura, tempo de reação, pH e concentração do agente oxidante. O processo de dopagem da PANI pode ser feito pela protonação em uma solução ácida.

Figura 5 – Estrutura química da polianilina.



Fonte: ABILEVITCH *et al*, 2023.

A polianilina é um polímero condutor que apresenta diferentes estados de oxidação, os quais influenciam significativamente suas propriedades óticas, estruturais e elétricas. As principais bases são: leucoesmeraldina, pernigranilina, esmeraldina e esmeraldina protonada, cujas colorações e características funcionais variam conforme o grau de oxidação, como pode ser verificado no Quadro 6 (Oliveira, 2015). A base de oxidação leucoesmeraldina (amarelo claro/incolor) é a forma reduzida do polímero, quando está no estado isolante. Entretanto, oxida-se rapidamente quando exposta ao ar. A base pernigranilina (violeta) é a forma totalmente oxidada do polímero. Embora sua coloração intensa possa sugerir atividade elétrica, este estado tende a apresentar baixa condutividade e pode indicar início de degradação química ou saturação oxidativa. A base esmeraldina (azul), representa o estado neutro, possui condutividade moderada, se apresentando como uma forma de transição entre as fases isolante e condutora. Esmeraldina protonada (verde) é o estado condutor mais estável da PANI, obtido por *doping* ácido. Apresenta elevada condutividade elétrica, sendo amplamente empregado em dispositivos eletrônicos, sensores e sistemas eletrocromáticos (Onggar, 2020).

Quadro 6 – Estado de oxidação da polianilina.

Estrutura química	Estado	Classificação	Cor
<p>Leucoesmeraldina</p>	100 % reduzida	Isolante	Amarelo (claro/incolor)
<p>Pernigranilina</p>	100 % oxidada	Isolante	Violeta
<p>Esmeraldina</p>	50 % oxidada	Semicondutora	Azul
<p>Esmeraldina protonada</p>	50 % oxidada	Condutora	Verde

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2015.

## 2.5 PROPOSTA DE ESTUDO

Diante das pesquisas apresentadas na revisão bibliográfica, é possível verificar o interesse crescente pela busca de materiais têxteis condutores para serem aplicados em *wearables* têxteis, trazendo como vantagem o conforto e flexibilidade. Destacando o interesse na utilização de malhas *spacer*, que devido a sua estrutura, composta por duas camadas conectadas por fio de ligação, apresentam propriedades interessantes para o desenvolvimento de novos produtos, relacionados à resiliência e à compressão.

Com isso, o intuito desse trabalho é apresentar o estudo do revestimento da polianilina em uma estrutura de malha *spacer*. Por meio de ensaios mecânicos, como resistência à abrasão

e resistência à tração, e ensaios de lavação com água e detergente, simular as ações externas às quais o material pode ser submetido em suas aplicações e a implicação desses agentes na condutividade elétrica do material para o desenvolvimento de *wearables* têxteis.

Ao realizar a busca na base Scopus por trabalhos científicos que contenham os termos “*wearables*” AND “*textile*” AND “*spacer*” no título, nenhuma publicação foi encontrada. No entanto, ao expandir a pesquisa e incluir esses termos no resumo e palavras-chave, foram identificadas nove publicações: uma em 2017; duas em 2021; quatro em 2022; uma em 2024 e uma em 2025. Esses dados evidenciam que o uso da malha *spacer* é pouco explorado na literatura científica, especialmente no contexto de *wearables* têxteis. Entretanto, considerando as propriedades interessantes desse tipo de raporte já mencionadas ao longo dessa dissertação, vislumbra-se uma grande oportunidade para a manufatura de um têxtil condutor de eletricidade para o desenvolvimento futuro de um sensor vestível. Portanto, a originalidade deste trabalho está justamente na abordagem desse material, que apresenta grande potencial para aplicações inovadoras em pesquisas na área têxtil e de engenharia de materiais e na sua simulação de uso.

### 3 METODOLOGIA

Essa seção aborda os materiais, métodos, caracterização que foram utilizadas no decorrer do trabalho.

#### 3.1 MATERIAIS

O material utilizado é uma malha de estrutura *spacer* produzida por um tear circular duplafrentura de malharia por trama com composição de poliéster e elastano nas duas camadas externas e com o fio de ligação de poliéster. A malha apresenta estrutura *jersey* em ambas as superfícies, com gramatura total de 452 g/m<sup>2</sup>. Na Tabela 2 são apresentados os títulos dos fios utilizados: camada externa 1, fio de ligação entre as duas superfícies, camada externa 2 e elastano. Na Tabela 3 é possível verificar parâmetros estruturais da malha a ser utilizada nesse trabalho.

Tabela 2 – Títulos médio dos fios.

<b>Filamento/ Multifilamento</b>	<b>Título (Tex)</b>	<b>Desvio padrão (± Tex)</b>	<b>Título (Ne)</b>	<b>Desvio padrão (± Ne)</b>
Camada externa 1	8,7	0,2	68	2
Fio de ligação	8,0	0,3	74	2
Camada externa 2	7,4	0,3	80	3
Elastano	19,7	0	30	0

Fonte: Gueths, C. P. (2024).

Tabela 3 – Dados estruturais da malha *spacer*.

<b>Dados</b>	<b>Valores</b>
Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	452 ± 8
Espessura (mm)	2,69 ± 0,02
Comprimento da laçada (cm) – camada 1	0,237 ± 0,002
Comprimento da laçada (cm) – camada 2	0,237 ± 0,001
Carreiras/cm – camada 1	15,8
Carreiras/cm – camada 2	15,8
Curso/cm – camada 1	37,4
Curso/cm – camada 2	37,0

Fonte: Adaptado de Gueths, C. P. (2024).

Para a polimerização *in situ* foi utilizada a anilina líquida, com massa molar 93,13 g/mol, ácido clorídrico massa molar 36,46 g/mol e como agente oxidante foi utilizado o cloreto de ferro III hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) com 270,3 g/mol de massa molar, concentração 0,10 mol/L, todos da marca Dinâmica.

## 3.2 MÉTODOS

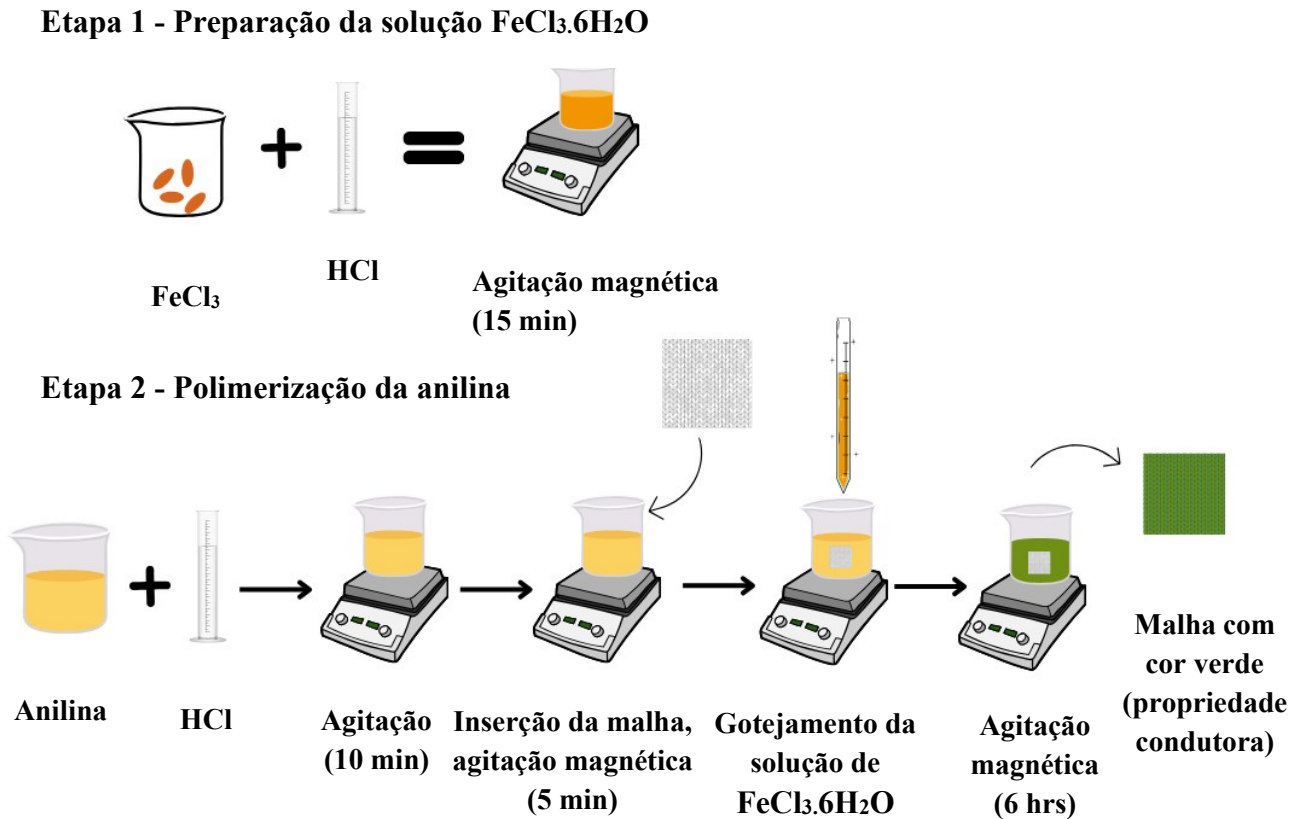
A parte experimental foi realizada nos laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) do campus de Blumenau e Florianópolis. A metodologia desse trabalho foi organizada nas seguintes etapas principais: 1) revestimento das malhas com polianilina para obtenção de um material condutor; 2) Avaliação da condutividade elétrica; 3) Realização da microscopia eletrônica de varredura; 4) Realização do ensaio eletromecânico; 5) Realização da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier; 6) Realização da calorimetria diferencial de varredura, 7) Realização da análise termogravimétrica, 8) Análise da resistência à tração; 9) Análise da resistência à abrasão; 10) Realização da solidez à lavagem; 11) Ensaio de solidez ao suor.

### 3.2.1 Revestimento das malhas com polianilina

O processo de polimerização *in situ* foi realizado conforme procedimento descrito na Figura 6. A razão molar entre o oxidante  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  e o monômero da anilina é 2:1. As concentrações utilizadas foram de 0,05 mol/L, 0,10 mol/L e 0,20 mol/L, com tempo de reação de 6 horas, conforme melhores resultados obtidos na metodologia apresentada por Merlini *et al.* (2015).

A primeira etapa consiste na solubilização do  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , com sua adição em 56,5 mL de ácido clorídrico (HCl 0,10 mol/L), mantidos sob agitação magnética durante 15 minutos, em temperatura ambiente, até a dissolução completa. A segunda etapa consiste na polimerização da anilina. Para isso, é necessário adicionar a anilina em um béquer e colocar a 56,5 mL da solução de HCl 0,10 mol/L. A seguir, deixa-se em agitação magnética durante 10 minutos. Depois, insere-se a malha cortada com as dimensões 4 cm x 4 cm neste mesmo béquer, e agita-se a solução por mais 5 minutos. Na sequência, foi gotejada lentamente a solução de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  na solução de anilina. Em seguida, manteve-se a solução em agitação magnética durante 6 horas. Para finalizar, a amostra foi lavada com HCl para remover os resíduos da reação de polimerização, e em seguida, seca na estufa com temperatura 40° por 24 horas.

Figura 6 – Etapas de polimerização *in situ* da polianilina.



Fonte: Autor (2025).

### 3.2.2 Condutividade elétrica

As amostras revestidas com polianilina foram submetidas ao ensaio de condutividade elétrica pelo método 4 pontas, realizado no Laboratório de Pesquisa em Polímeros e Compósitos (POLICOM) em Florianópolis na UFSC. Nesse ensaio, a corrente elétrica é aplicada entre os terminais externos, para medir a tensão, com auxílio de uma fonte de tensão da marca Keithley, modelo 6220. Um eletrômetro da marca Keithley, modelo 6517A, é utilizado para medir a diferença de potencial elétrico. Este método é utilizado para avaliar a condutividade elétrica com resistividade superior a  $10^{-7} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ . A condutividade da malha foi calculada a partir da equação

$$\sigma = \frac{I}{V} \times \frac{\ln 2}{\pi} \times \frac{1}{w} \quad [1]$$

Onde:

$\sigma$  = Condutividade elétrica [ $\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ];

$w$  = Espessura da amostra [cm];

$V$  = Diferença de potencial elétrico [v];

$I$  = Corrente elétrica [A];

$\frac{\ln 2}{\pi}$  = Fator de correção.

### 3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O MEV foi utilizado para obter imagens da superfície dos materiais, com o objetivo de verificar a deposição do polímero sobre o substrato fibroso. As imagens do MEV foram obtidas no Laboratório Multiusuário de Caracterização Avançada (LMCA), na UFSC em Blumenau. Foram analisadas imagens antes e após o revestimento com a polianilina, com o objetivo de analisar a morfologia das amostras. Além disso, utilizou-se para avaliar a superfície das amostras após os ciclos de lavagem e abrasão. O microscópio utilizado é da marca Jeol NeoScope, modelo JCM-7000, com ampliações de 50x, 500x e 2000x.

### 3.2.4 Ensaio eletromecânico

Para investigar o comportamento piezoresistivo das malhas *spacer* revestidas com polianilina, foram realizados ensaios eletromecânicos com as amostras com concentração de 0,05 mol/L, 0,1 mol/L e 0,2 mol/L. O procedimento seguiu o método de compressão da malha, com a realização de cinco ciclos.

Para a realização da análise, as amostras são cortadas em quadrados de  $2,0 \times 2,0$  cm e posicionadas entre dois eletrodos dentro de um cilindro de poli(tetrafluoretileno) (PTFE). Esse arranjo segue o princípio da medição de resistividade por método de duas pontas. O cilindro tem a função de isolar eletricamente a amostra do restante do equipamento, sendo inserido entre duas placas do sistema de medição. Os eletrodos, por sua vez, são conectados aos polos correspondentes do eletrômetro, garantindo a precisão na coleta dos dados (Simon, L, 2022).

As amostras foram submetidas a diferentes níveis de tensão mecânica: 250 KPa, 500 KPa e 1000 KPa. Os ensaios foram conduzidos com o auxílio da máquina universal de ensaios, marca EMIC DL 2000, instalada no Laboratório de Análises Térmicas da UFSC, no Campus Florianópolis. A coleta e análise dos dados foi realizada por meio de um *software* específico, conectado a uma interface eletrônica entre o eletrômetro Keithley (modelo KUSB 488B) e o computador. A variação da resistência é calculada pela equação 2.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{(R - R_0)}{R_0} \quad [2]$$

Onde:

R = resistência elétrica de um determinado ponto em  $\Omega$ ;

R<sub>0</sub> = resistência elétrica inicial em  $\Omega$ ;

### **3.2.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)**

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier no modo refletância total atenuada foi utilizado para analisar a efetividade da polimerização da PANI na superfície da malha. A caracterização foi realizada no Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE), no equipamento da marca Perkin Elmer. Foi feita a análise nos números de onda de 4.000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , com um total de 16 varreduras por amostra.

### **3.2.6 Calorimetria diferencial de varredura (DSC)**

O DSC foi realizado com o objetivo de verificar as transições térmicas da malha com polianilina. O equipamento utilizado é da marca Netzsch, modelo Polyma DSC 14, do Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE). Utilizou-se taxa de aquecimento de 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e faixa de temperatura entre 20  $^{\circ}\text{C}$  a 300  $^{\circ}\text{C}$ , em atmosfera de nitrogênio. Esse ensaio foi realizado com o material antes e após o revestimento com polianilina, para comparar o desempenho entre os materiais e avaliar o efeito da polimerização.

### **3.2.7 Análise termogravimétrica (TGA)**

A análise termogravimétrica (TGA) foi empregada para avaliar a estabilidade térmica e o comportamento de decomposição dos materiais estudados. Essa técnica consiste no monitoramento da variação de massa da amostra em função da temperatura ou do tempo, permitindo identificar transformações físicas e químicas. Foi utilizado o equipamento TGA 8000 da Perkin Elmer®, presente no Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE) da UFSC, Campus Blumenau, com taxa de aquecimento de 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e faixa de temperatura entre 30  $^{\circ}\text{C}$  a 700  $^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.8 Resistência à tração

O ensaio de resistência à tração foi realizado antes e após a funcionalização, adaptado da norma ISO 13934-1:2016. O ensaio foi efetuado no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM), na UFSC em Blumenau. O objetivo do ensaio consiste em verificar se o revestimento com PANI influencia nas propriedades mecânicas do material. O comportamento mecânico foi avaliado por meio de um gráfico de tensão *versus* deformação, onde é possível analisar a tensão na ruptura, alongamento e módulo de elasticidade. O ensaio foi conduzido em amostras com dimensões de 40 × 60 cm, aplicando-se uma velocidade de ensaio de 100 mm/min, uma pré-carga de 0,5 N e uma taxa de aplicação da pré-carga de 50 mm/min. As medições foram realizadas nas direções longitudinal (coluna) e transversal (fileira) das amostras.

### 3.2.9 Resistência à abrasão

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado no equipamento Martindale, da marca Texcontrol, modelo TC 145, presente no laboratório de Tecidos e Malhas (LABTEC) na UFSC em Blumenau. O ensaio foi realizado conforme especificado na Norma ISO 12945-2:2000.

Durante o ensaio, as amostras foram submetidas à fricção contra um tecido abrasivo sob uma carga constante de 12 kPa, em múltiplas direções, com o objetivo de simular condições reais de uso e avaliar a durabilidade do material. Foram utilizadas amostras circulares com 38 mm de diâmetro, e os testes foram realizados em triplicata para garantir a reprodutibilidade dos resultados. Foram aplicados 4000 ciclos nas amostras funcionalizadas e 5000 ciclos nas amostras não funcionalizadas. Após o ensaio de abrasão, foi realizada a análise de condutividade elétrica, com o intuito de verificar a influência do desgaste mecânico sobre as propriedades elétricas do material.

### 3.2.10 Solidez à lavagem

Para analisar possíveis variações na massa e de condutividade elétrica das amostras, foi realizado um ensaio de solidez à lavagem nas malhas *spacer* após o processo de revestimento com polianilina. A metodologia adotada foi baseada em uma adaptação da norma ISO 105 C06:2010. O procedimento consistiu na simulação de 5, 10 e 15 ciclos de lavagem, realizados em triplicata. As amostras, com dimensões de 40 mm × 40 mm, foram acondicionadas em erlenmeyers contendo uma solução de água e detergente líquido sem alvejante, na concentração

de 4 g/L. O processo foi conduzido por 30 minutos, sob temperatura controlada de 40 °C. A agitação foi realizada com o auxílio do equipamento Shaker, da marca New Lab, modelo NL-343-01, localizado no Laboratório de Meio Ambiente (LABMAM) da UFSC, Campus Blumenau. Foi feita a medição da massa antes e após a lavagem. Após a lavagem, foi realizado o ensaio de condutividade para verificar a influência do ciclo de lavagens na condutividade elétrica das amostras.

### **3.2.11 Solidez ao suor**

O ensaio de solidez ao suor foi realizado nas amostras funcionalizadas com polianilina, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ISO 105-E04:2014. O objetivo foi avaliar possíveis variações na condutividade elétrica após a exposição a soluções simuladoras de suor humano, em suas formas ácida e alcalina. O ensaio foi realizado em triplicata nas soluções por um período de 30 minutos. Em seguida, foram submetidas à secagem em estufa a 40 °C por 24 horas. Os ensaios foram realizados nas instalações do LABTEC, localizado no Campus Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados, seguidos de suas respectivas discussões. Inicialmente, são analisados os dados referentes ao revestimento da malha *spacer* com a polianilina, ensaios de condutividade elétrica, propriedade eletromecânica e desempenho das três concentrações avaliadas. Na sequência, discutem-se os resultados dos ensaios de resistência à tração, solidez à abrasão, à lavagem e ao suor, bem como as análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), calorimetria diferencial exploratória (DSC) e análise termogravimétrica (TGA).

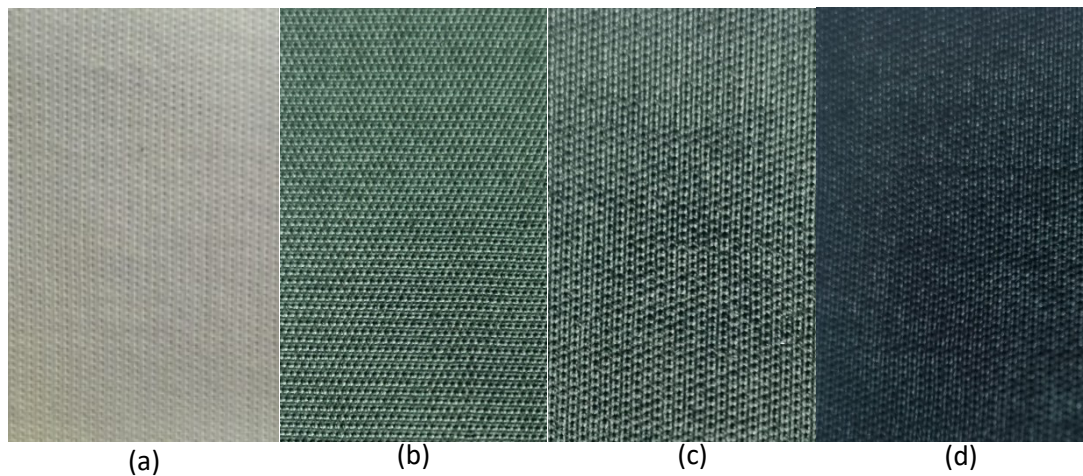
### 4.1. REVESTIMENTO DA MALHA *SPACER* COM POLIANILINA

A técnica empregada para o revestimento da malha *spacer* com polianilina foi conduzida conforme os procedimentos descritos na seção 3.2.1, utilizando o método de polimerização oxidativa *in situ*. Após o término da reação, foi identificada, por meio de inspeção visual e tátil, a presença de resíduos sobre as amostras, relacionada ao excesso de polímero não aderido. Esse material foi removido por meio de uma etapa de lavagem com solução aquosa de HCl, 0,10 mol/L. Após a secagem, não se observou mais a liberação dos resíduos.

Verificou-se que a variação na concentração da polianilina promoveu modificações perceptíveis na coloração do material, resultando em tonalidades que variaram do esverdeado claro ao verde intenso (Figura 7). Esse comportamento evidencia uma correlação entre a concentração de anilina na polimerização e fração de PANI depositada na superfície da malha, sendo este um fator determinante na intensidade da coloração verde apresentada. A coloração verde, adquirida após a reação, é atribuída à presença da polianilina na forma de sal de esmeraldina, considerada a configuração condutiva do polímero, evidenciando que a síntese ocorreu de forma satisfatória. Além disso, notou-se que a deposição da PANI foi homogênea, cobrindo integralmente a superfície da malha.

Durante o processo de funcionalização, notou-se que a estrutura tridimensional da malha *spacer* favoreceu a incorporação da polianilina de forma eficiente, permitindo o recobrimento das fibras em múltiplas direções. Essa característica é especialmente relevante, pois proporciona maior área de contato entre o polímero condutor e o substrato têxtil, o que pode contribuir para o desempenho elétrico e mecânico do material.

Figura 7 – Amostra antes a) e após o revestimento com a polianilina realizado com diferentes concentrações de monômero b) 0,05 mol/L, c) 1,0 mol/L e c) 2,0 mol/L.



Fonte: Autor (2025).

## 4.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

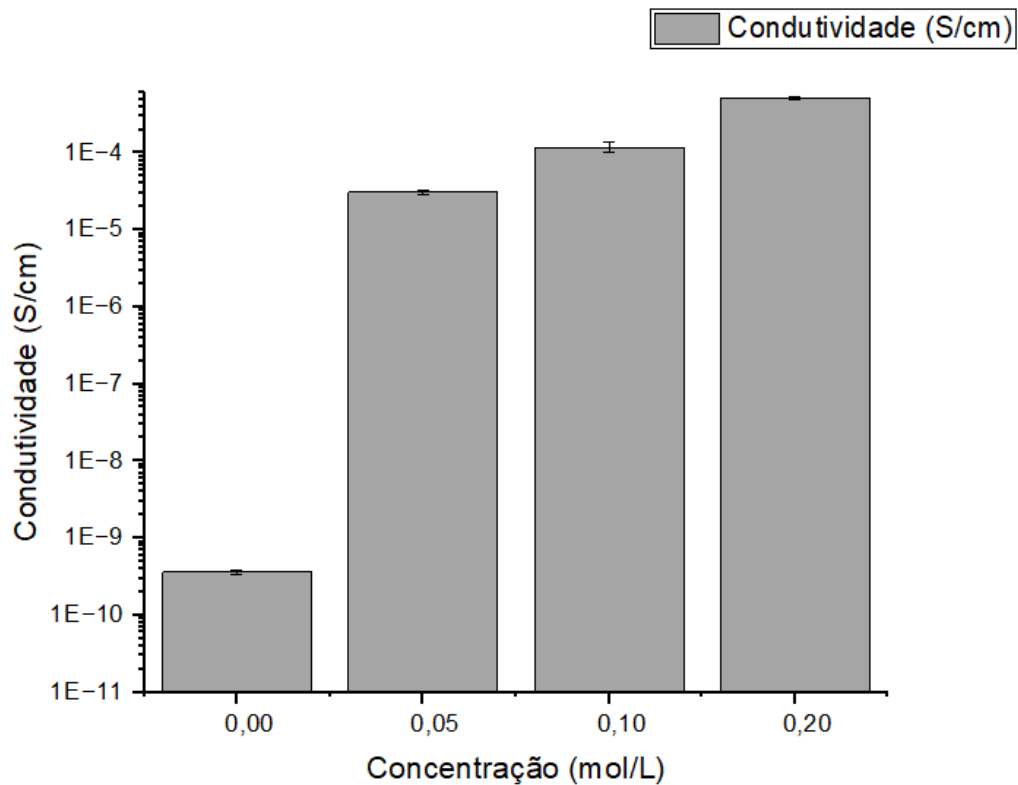
As amostras revestidas com polianilina foram submetidas ao ensaio de condutividade elétrica com o objetivo de avaliar a influência da concentração do monômero (0,05 mol/L, 0,10 mol/L e 0,20 mol/L) na formação de um revestimento condutor, de acordo com os dados apresentados na Figura 8 e Tabela 4. Observou-se um aumento significativo nos valores de condutividade elétrica à medida que a concentração de anilina foi elevada, indicando uma relação direta entre a quantidade de monômero presente no meio reacional e a eficiência do revestimento condutor.

A amostra não revestida apresentou condutividade na ordem de  $10^{-10}$  S/cm, típica de substratos isolantes. Com a introdução do polímero, houve uma evolução gradativa nos valores, atingindo  $5,10 \times 10^{-4}$  S/cm na amostra com 0,20 mol/L de concentração de PANI, o que caracteriza a transição para um comportamento semicondutor. Além disso, os baixos desvios padrão registrados nas amostras reforçam a reprodutibilidade do processo de polimerização *in situ* e a consistência na formação do revestimento condutor.

Em sua pesquisa, ANDRE (2023) revestiu resíduo de couro com polimerização *in situ* da polianilina, e observou um aumento significativo na condutividade elétrica do material. A amostra sem revestimento apresentava condutividade de  $2,1 \times 10^{-7}$  S/m, enquanto após a funcionalização com polianilina, a condutividade aumentou para  $20,1 \times 10^{-3}$  S/m. Esse resultado

representa um ganho de quatro ordens de grandeza em relação à amostra não funcionalizada, evidenciando o impacto da modificação na performance elétrica do resíduo de couro.

Figura 8 – Avaliação da condutividade elétrica do substrato com diferentes concentrações de PANI.



Fonte: Autor (2025).

Tabela 4 - Condutividade elétrica das amostras têxteis revestidas com polianilina, em diferentes concentrações do monômero.

Concentração de ANI (mol/L)	Condutividade elétrica (S/cm)	Desvio Padrão ( $\pm$ )
0,00	$3,59 \times 10^{-10}$	$2,038 \times 10^{-11}$
0,05	$3,11 \times 10^{-5}$	$2,233 \times 10^{-6}$
0,10	$1,17 \times 10^{-4}$	$1,817 \times 10^{-5}$
0,20	$5,10 \times 10^{-4}$	$1,47 \times 10^{-5}$

Fonte: Autor (2025).

SHAKIR *et al.* (2023) realizaram a polimerização *in situ* da polianilina sobre um tecido de poliéster, empregando persulfato de amônio (APS) como agente oxidante e ácido fórmico como dopante. Utilizando uma concentração de 1 mL de anilina e 2,4 g de APS, foi possível obter uma condutividade elétrica de 1,3 S/cm, evidenciando a eficácia do processo na funcionalização condutora do material. Nimra *et al.* (2023) revestiram fibras de poliéster por

meio da polimerização *in situ* da polianilina, utilizando APS como agente oxidante e ácido fórmico como dopante. O processo resultou em uma condutividade elétrica de 0,097 S/cm.

Embora os valores de condutividade obtidos neste estudo tenham sido inferiores aos reportados por outros autores, destaca-se que a variação na condutividade pode ser atribuída, em parte, à influência dos diferentes dopantes, metodologia experimental, agentes oxidantes utilizados e porosidade do material têxtil, o que reforça a complexidade e a sensibilidade do processo. Ainda assim, a evolução gradativa da condutividade com o aumento da concentração de PANI, associada à baixa dispersão dos dados, evidencia a consistência metodológica e a reprodutibilidade do procedimento adotado. A escolha criteriosa dos parâmetros experimentais amplia o escopo de aplicação da polianilina, oferecendo uma base sólida para futuras otimizações e para o desenvolvimento de materiais condutores com propriedades ajustáveis.

#### 4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

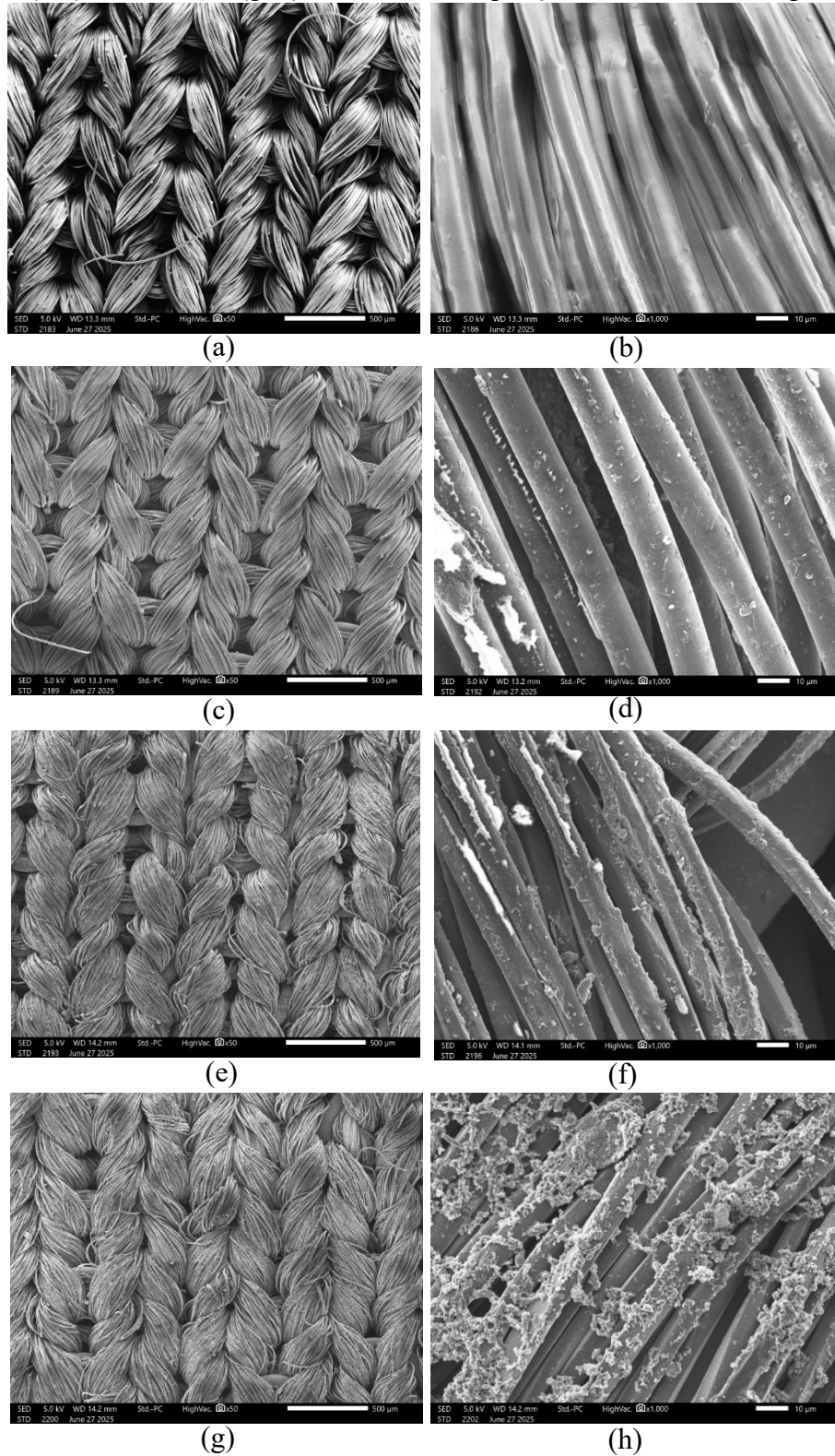
As amostras de malha antes e após o revestimento com polianilina nas concentrações de 0,05 mol/L, 0,1 mol/L e 0,2 mol/L foram analisadas por MEV, com o objetivo de investigar a homogeneidade do revestimento na superfície das malhas antes e após a funcionalização. Na Figura 9-a pode-se observar o entrelaçamento das fibras, característico de um substrato de malha e na Figura 9-b, com ampliação de 500x, verifica-se a superfície lisa de uma fibra com ausência de material depositado.

A partir das imagens das malhas revestidas, não se observa alteração da estrutura da malha, ou seja, não houve desfibrilação e/ou rompimento das fibras. Para as amostras revestidas com concentração de 0,05 mol/L (Figura 9-c e d), observa-se um revestimento pouco homogêneo de polianilina na superfície das fibras, visível como uma camada com aspecto rugoso e pontos de acúmulo irregular. Essa morfologia indica que, embora a concentração de 0,05 mol/L tenha sido suficiente para iniciar o processo de polimerização, a deposição do polímero ainda é limitada, resultando em menor cobertura, o que justifica uma menor eficiência condutora em comparação com as concentrações superiores avaliadas (0,10 mol/L e 0,20 mol/L).

A amostra revestida com polianilina na concentração de 0,1 mol/L evidenciou uma certa evolução em relação à amostra padrão e a de concentração de 0,05 mol/L. É possível observar na Figura 9-f que a superfície das fibras apresenta uma maior cobertura de estruturas granulares, o que sugere uma deposição mais espessa e contínua do revestimento de polianilina. Essa morfologia indica que a concentração intermediária favoreceu não apenas a deposição sobre o

substrato, mas também uma distribuição mais uniforme, aspecto essencial para assegurar a eficiência e estabilidade da condutividade elétrica.

Figura 9 – MEV das malhas (a, b) antes do revestimento e após com concentrações de (c, d) 0,05 mol/L, (e, f) 0,10 mol/L, (g, h) 0,20 mol/L, ampliações 50x e 1000x, respectivamente



Fonte: Autor (2025)

Na concentração de 0,2 mol/L, observou-se um revestimento com maior preenchimento dos espaços interfibrilares, evidenciando uma deposição mais significativa do polímero sobre as fibras têxteis. Uma maior quantidade de polianilina depositada nas malhas possibilita a obtenção de maiores valores de condutividade elétrica, conforme observado anteriormente. Com bases nos resultados obtidos, reforça-se a hipótese de que uma maior concentração do monômero promove a formação de um revestimento condutor mais espesso e eficiente. No entanto, apesar do aumento na densidade do revestimento, é possível identificar regiões com acúmulo de material e uma distribuição não homogênea ao longo do substrato, o que pode impactar negativamente a uniformidade das propriedades condutoras (Figura 9-h).

#### 4.4 ELETROMECAÂNICO

Os ensaios eletromecânicos foram realizados nas amostras funcionalizadas com polianilina nas concentrações de 0,05 mol/L, 0,1 mol/L e 0,2 mol/L, com o objetivo de investigar o comportamento da condutividade elétrica sob diferentes níveis de compressão mecânica. As amostras foram submetidas a pressões de 250 kPa, 500 kPa e 1.000 kPa para 5 ciclos de repetições de compressão e descompressão, com o objetivo de investigar a estabilidade da condutividade elétrica frente à deformação mecânica cíclica, simulando condições de deformação encontradas em aplicações reais de materiais têxteis funcionais.

A avaliação eletromecânica da amostra revestida com polianilina na concentração de 0,05 mol/L (Figura 10), evidencia uma resposta sensível à aplicação de carga, com oscilações nos picos de resistência elétrica relativa a cada ponto medido ( $\Delta R/R_0$ ), sincronizadas com os 5 ciclos de compressão e liberação de carga. Quando se aplica uma tensão de compressão, observa-se uma redução na resistividade elétrica do material e quando essa tensão é removida, a resistividade elétrica aumenta. Entretanto, ao longo dos cinco ciclos de compressão e descompressão, para os três níveis de pressão, observa-se uma variação significativa na estabilidade do sinal, marcada por dispersões consideráveis do primeiro para os demais ciclos. Essa variação da resposta elétrica ao longo dos ciclos chama-se histerese. A histerese pode estar associada à natureza viscoelástica do material polimérico utilizado no futuro sensor, que provoca um atraso na reorganização das cadeias moleculares após a retirada do estímulo mecânico. Como descrito por Jeong *et al.* (2015), esse atraso é característico de materiais viscoelásticos e resulta em uma resposta elétrica distinta entre os ciclos de compressão e descompressão.

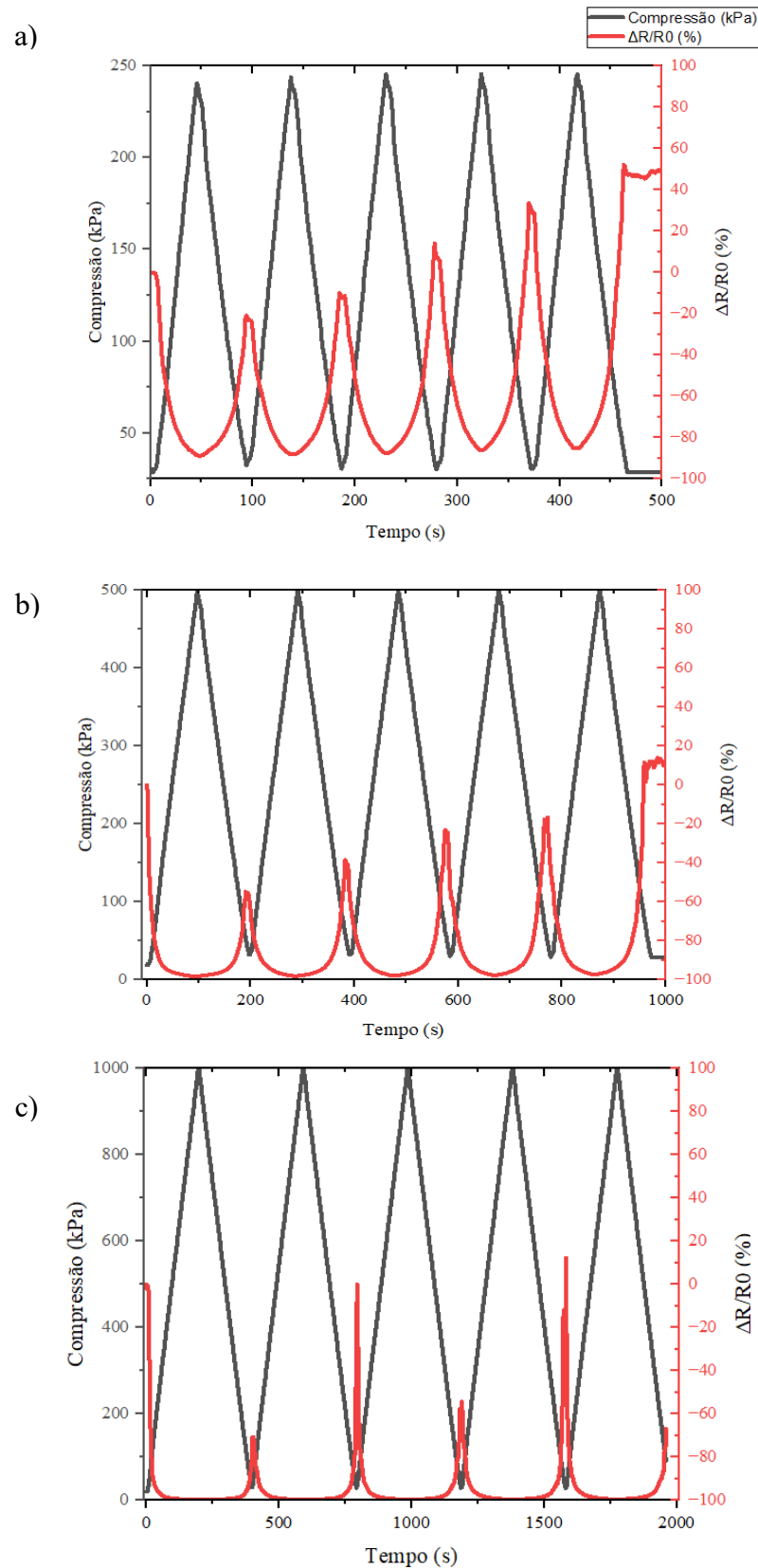
Além disso, esse comportamento sugere que a baixa concentração de polianilina não proporciona um bom revestimento condutor, resultando em trajetos elétricos instáveis e sensíveis a variações estruturais causadas pela deformação. Outro fenômeno que pode ser responsável pela histerese, é que com a aplicação de tensão de compressão, ocorre o “encontro das fibras revestidas”, as quais não conseguem se separar quando a compressão é removida, resultando em diferentes valores de resistividade elétrica. Assim, infere-se que, para aplicações que envolvam esforços mecânicos repetidos ou prolongados, concentrações menos elevadas do monômero sejam menos adequadas para garantir a integridade funcional do material.

A Figura 11 demonstra a existência da alteração dos picos do sinal de resistência elétrica relativa ( $\Delta R/R_0$ ) frente aos diferentes níveis de pressão aplicados, mantendo-se a histerese nos resultados, com oscilações mais similares entre os diferentes níveis de compressão, que apresentou um melhor resultado comparado com a concentração de 0,05 mol/L. Esses resultados corroboram as análises morfológicas realizadas por MEV, que evidenciaram uma deposição mais uniforme do filme de polianilina sobre o substrato têxtil nessa concentração (0,10 mol/L).

A avaliação eletromecânica da amostra na concentração de 0,20 mol/L sob pressões de 250 kPa (Figura 12-a), 500 kPa (Figura 12-b) e 1000 kPa (Figura 12-c) demonstrou um desempenho superior em relação as outras concentrações em termos responsividade elétrica durante os ciclos de compressão mecânica. Em todos os níveis de compressão, o sinal de resistência elétrica relativa ( $\Delta R/R_0$ ) apresentou oscilações mais regulares. Esse comportamento está em conformidade com os resultados morfológicos previamente observados por MEV, que indicaram uma maior deposição do filme de polianilina.

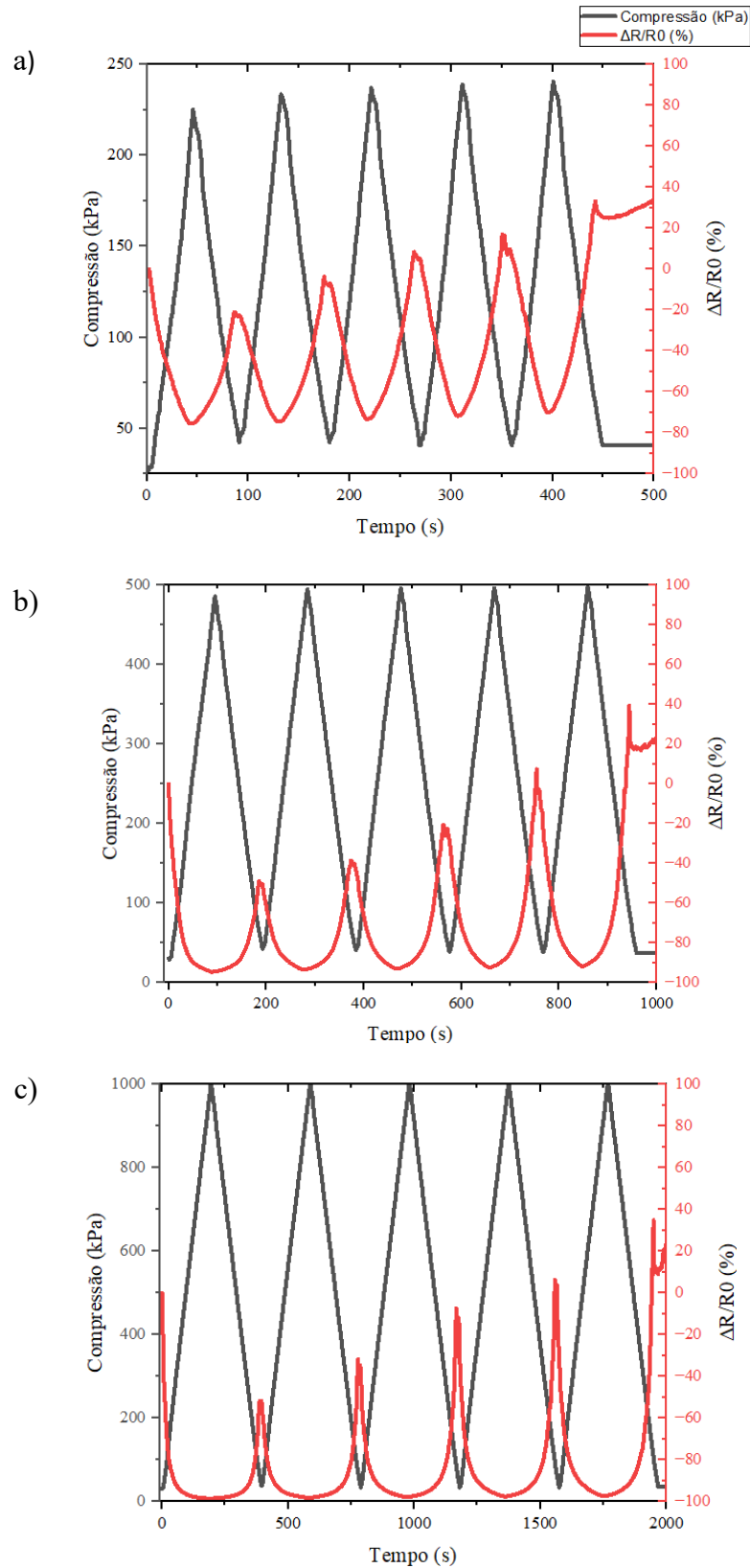
Na Figura 13, é demonstrada a sensibilidade à pressão (PS) das amostras funcionalizadas com diferentes concentrações de polianilina. Observa-se que, à medida que a pressão aumenta, a PS tende a diminuir, indicando que o material se torna menos responsivo a variações adicionais de carga após certo limite. A amostra com concentração de 0,20 mol/L apresenta os maiores valores de PS em todas as faixas de pressão, demonstrando uma rede condutora mais eficiente e sensível. Já a amostra com 0,05 mol/L exibe os menores valores de PS, refletindo uma estrutura menos uniforme e menos capaz de detectar variações sutis de compressão. Esses dados reforçam que concentrações mais elevadas de polianilina favorecem a formação de caminhos elétricos contínuos e estáveis, essenciais para aplicações em sensores têxteis.

Figura 10 – Malha revestida com PANI, obtida com concentração de 0,05 mol/ L de anilina: resposta piezoresistiva ( $\Delta R/R_0$ ) em % e tensão de compressão em (a) 250 kPa, (b) 500 kPa e (c) 1000 kPa em função do tempo de ensaio.



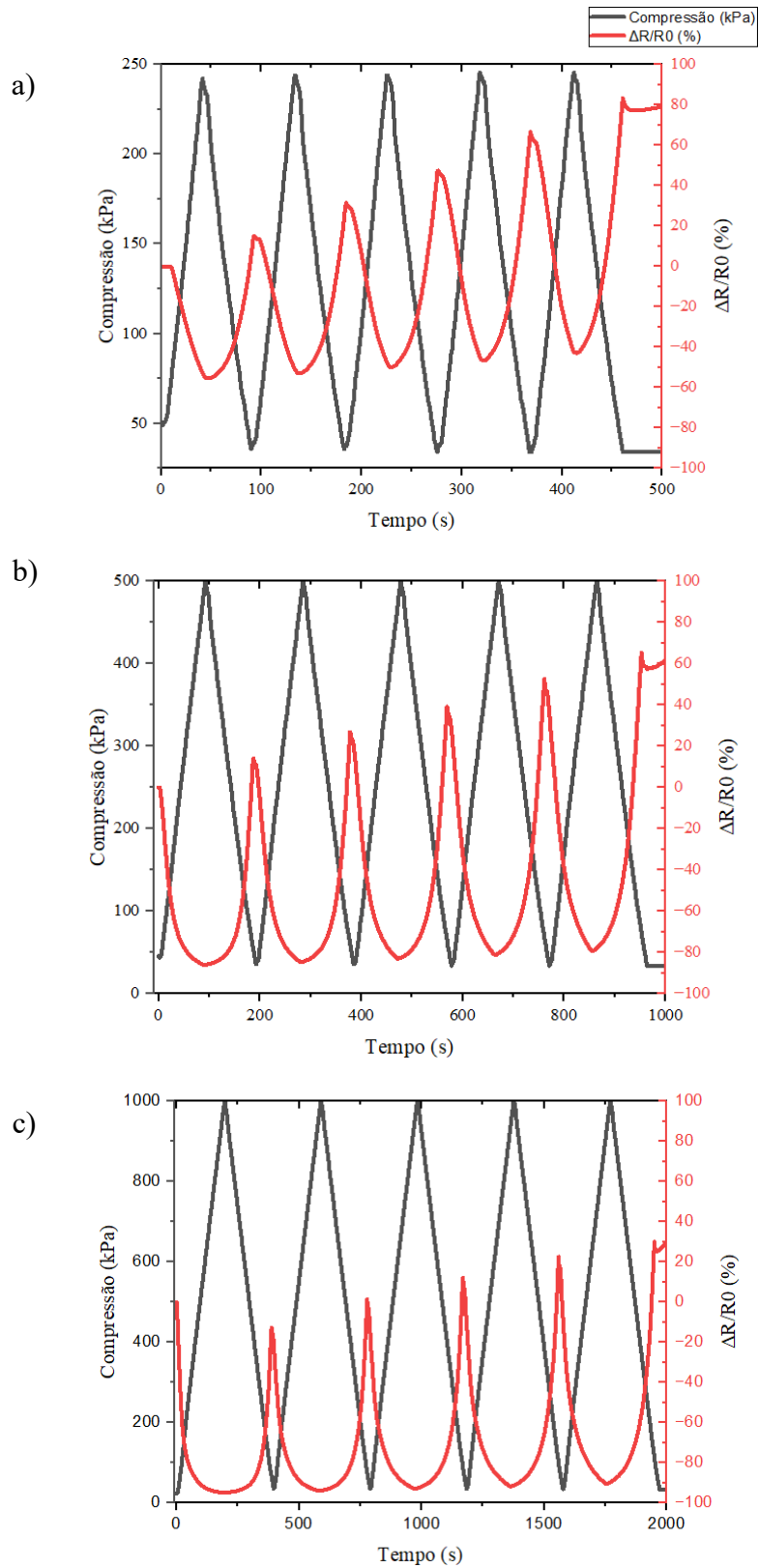
Fonte: Autor (2025).

Figura 11 – Malha revestida com PANI, obtida com concentração de 0,10 mol/ L de anilina: resposta piezoresistiva ( $\Delta R/R_0$ ) em % e tensão de compressão em (a) 250 kPa, (b) 500 kPa e (c) 1000 kPa em função do tempo de ensaio.



Fonte: Autor (2025).

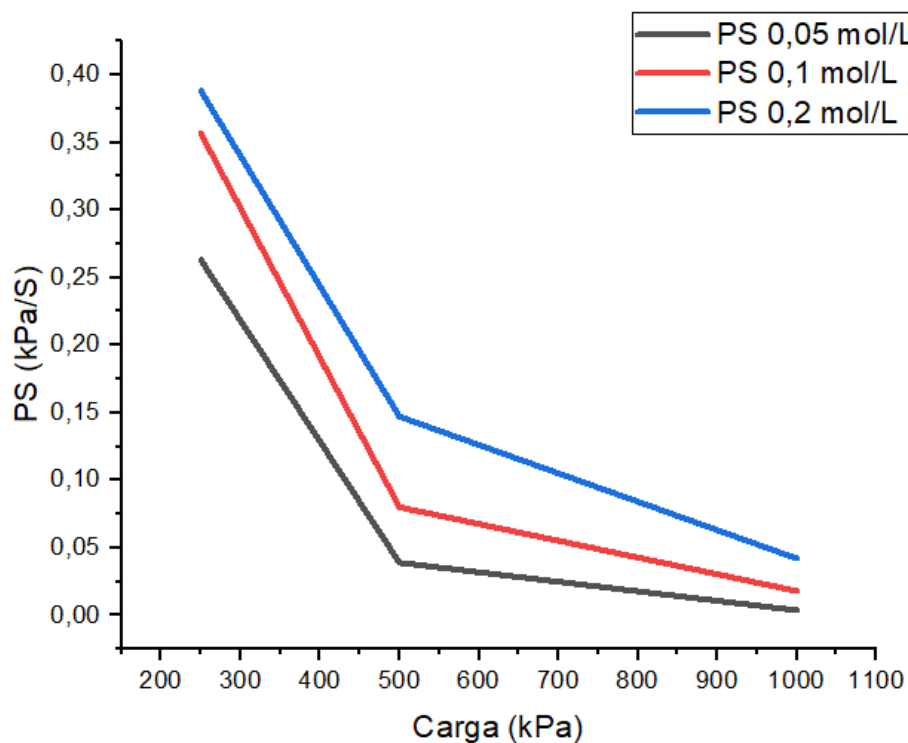
Figura 12 – Malha revestida com PANI, obtida com concentração de 0,20 mol/ L de anilina: resposta piezoresistiva ( $\Delta R/R_0$ ) em % e tensão de compressão em (a) 250 kPa, (b) 500 kPa e (c) 1000 kPa em função do tempo de ensaio.



Fonte: Autor (2025).

Para dar continuidade aos ensaios e otimizar os resultados, foi escolhida a concentração de 0,10 mol/L. Essa decisão baseia-se na análise dos dados de condutividade elétrica, que indicam desempenho semelhante entre as concentrações de 0,10 mol/L e 0,20 mol/L, e nas micrografias obtidas por MEV, que revelam excesso de agente condutor não fixado na amostra com 0,20 mol/L. Embora os resultados eletromecânicos tenham sido ligeiramente superiores nessa concentração mais elevada, o comprometimento da uniformidade e da aderência do revestimento justifica a escolha da concentração de 0,10 mol/L como a mais adequada para os ensaios subsequentes.

Figura 13 – Sensibilidade à pressão em kPa em função da taxa de carga em kPa/S para as amostras com concentração de 0,05 mol/L, 0,10 mol/l e 0,20 mol/L.



Fonte: Autor (2025).

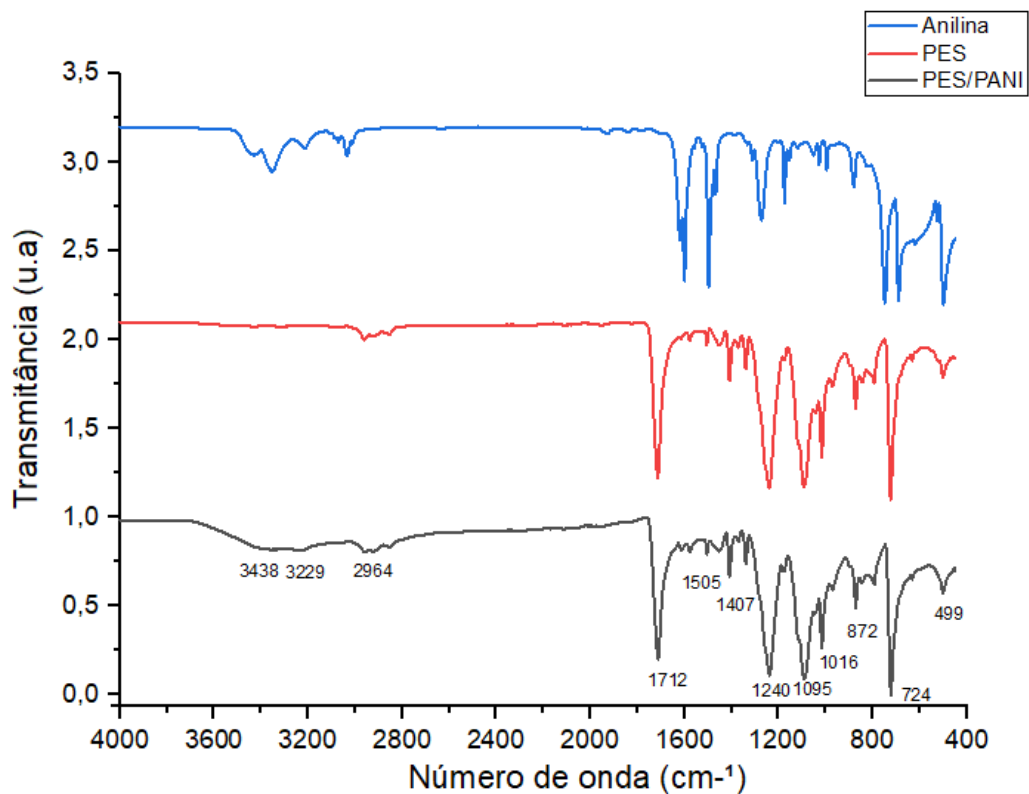
#### 4.5 FTIR

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica essencial para a caracterização de materiais, permitindo a identificação de grupos funcionais e a análise de interações químicas. Neste estudo, a técnica foi aplicada para comparar os espectros da anilina, amostra de malha de PES antes e após funcionalizar (Figura 14).

De acordo com o estudo de Bhattacharya e Chaudhari (2014) sobre fibras de poliéster, a banda característica localizada próxima a  $1712\text{ cm}^{-1}$  é indicativa da vibração de estiramento da ligação carbono-oxigênio (C=O). A região em torno de  $1407\text{ cm}^{-1}$  está associada à presença de anéis aromáticos, enquanto os sinais registrados em aproximadamente  $1016\text{ cm}^{-1}$  sugerem a ocorrência de grupos hidroxila, característicos de álcoois secundários.

A amostra de malha revestida apresenta bandas vibracionais em  $1505\text{ cm}^{-1}$  e  $724\text{ cm}^{-1}$  indicando a formação da polianilina (PANI), sendo essas bandas atribuídas, respectivamente, ao estiramento das ligações C=C no anel benzenoide e à vibração da ligação C=N (Machado, A. L, 2024). Em  $1095\text{ cm}^{-1}$  indica o estiramento de  $\text{CN}_2$  na cadeia principal da polianilina. A banda em  $1407\text{ cm}^{-1}$  está relacionada às vibrações de estiramento  $\text{C}_2$  dos anéis quinoides e benzenoides da polianilina (HASSAN, 2025). A banda em  $2.964\text{ cm}^{-1}$  é atribuída ao estiramento assimétrico das ligações C-H de grupos metila (Kellenberg, 2010, A. *et al.*).

Figura 14 – FTIR das amostras antes e após o revestimento (concentração de 0,10 mol/L).

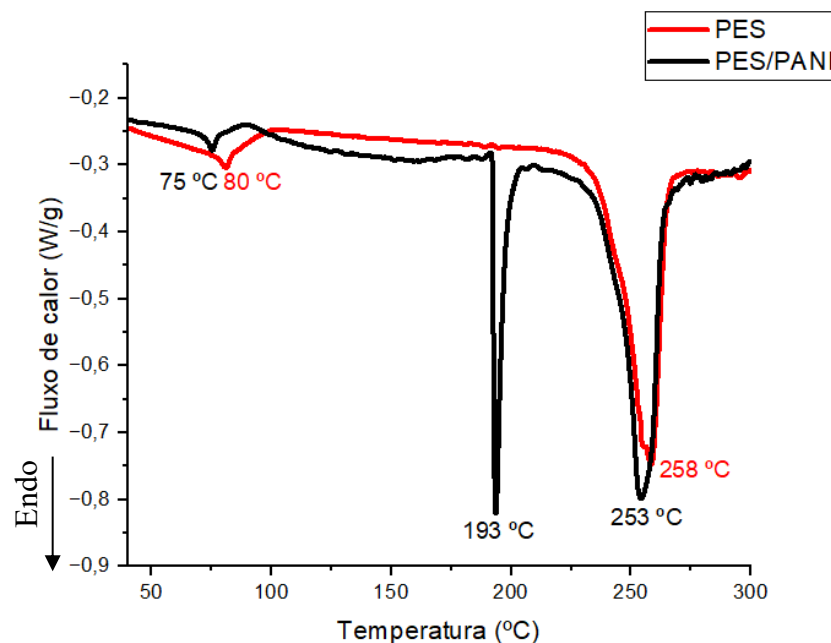


Fonte: Autor (2025).

#### 4.6 DSC

As análises de DSC foram realizadas antes e após a funcionalização com a polianilina, com concentração de 0,10 mol/L, com objetivo de analisar o comportamento da malha mediante a polimerização *in situ* da polianilina. Na Figura 15 é possível observar o gráfico da análise do DSC. Conforme observado nas curvas do gráfico de DSC da malha de poliéster antes do revestimento, há a presença de duas transições endotérmicas preponderantes nas temperaturas de 80 °C e 258 °C. A transição em 80 °C é relativa à temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do polímero. O segundo pico, em 258°C, está relacionado a temperatura de fusão ( $T_f$ ) da fibra de poliéster.

Figura 15 – DSC da malha antes e após o revestimento com polianilina, obtida com concentração de 0,10 mol/L de ANI.



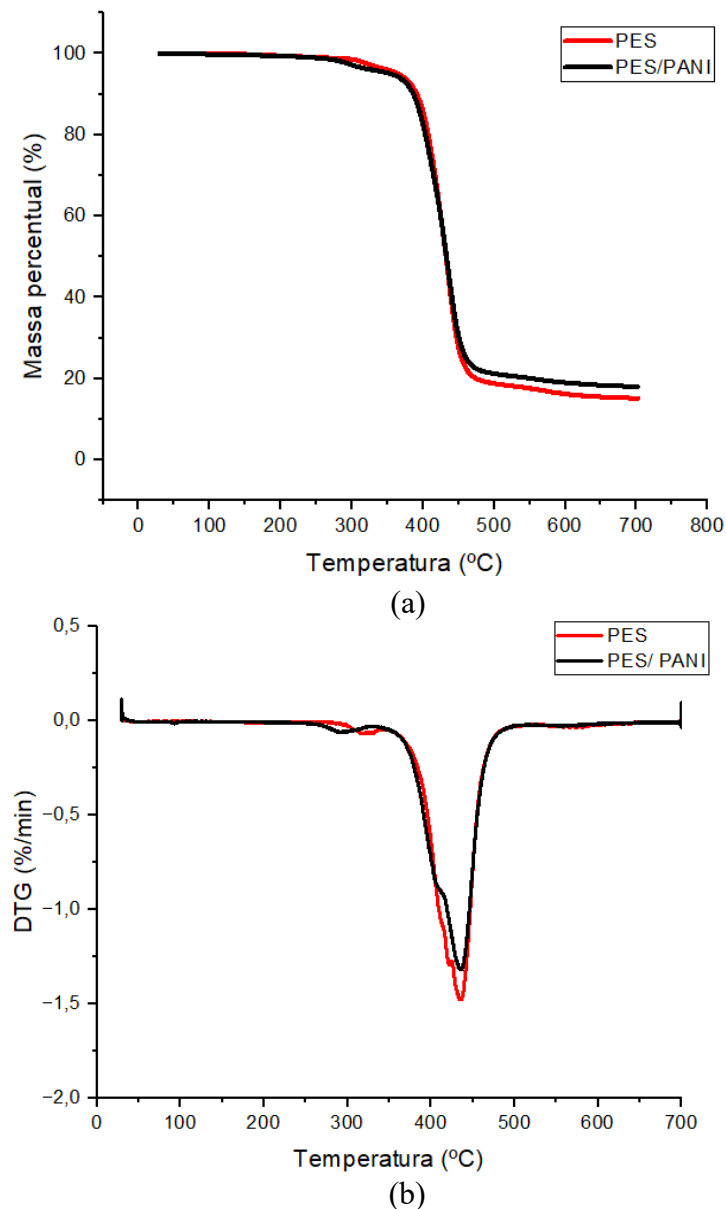
Fonte: Autor (2025).

A amostra após a funcionalização com a polianilina, apresentou três picos endotérmicos. A primeira transição em 75 °C é relativo a  $T_g$  do material. Em 193 °C observa-se um pico que não estava presente na malha de poliéster antes da funcionalização. Esse evento pode estar relacionado à degradação da polianilina. O pico em 254 °C está associado à temperatura de fusão da malha. Dessa forma, a análise de DSC evidencia que o revestimento com polianilina reduziu as temperaturas de transição em relação a malha sem revestimento.

#### 4.7 TGA

A análise das curvas de TGA e DTG (Figura 16) da malha não funcionalizada revela dois estágios distintos de degradação térmica, ocorrendo aproximadamente nas temperaturas de 325 °C e 436 °C. O primeiro estágio, em torno de 325 °C pode estar associado a resíduos de processamento, indicando o início da perda de massa sem comprometer a estrutura principal do material. Já o segundo estágio, próximo de 436 °C, corresponde à degradação da matriz polimérica da malha, o poliéster, caracterizando a quebra das cadeias poliméricas.

Figura 16- a) TGA e b) DTG da malha com concentração de 0,10 mol/L de ANI antes e após a funcionalização com polianilina.



Fonte: Autor (2025).

A amostra funcionalizada com polianilina, utilizando concentração de 0,10 mol/L, apresentou dois estágios distintos de degradação térmica, conforme observado nas curvas de TGA e DTG. O primeiro estágio ocorre em aproximadamente 286 °C, sendo atribuído à degradação da polianilina incorporada à malha, o que está em concordância com os dados obtidos por DSC. Já o segundo estágio, mais acentuado, ocorre em torno de 432 °C e está relacionado à decomposição da estrutura polimérica principal da malha, indicando a quebra das cadeias do polímero base, o poliéster.

Observou-se uma diferença significativa na massa residual a 700 °C, na qual a amostra não funcionalizada apresentou uma maior porcentagem de perda de massa em comparação à amostra funcionalizada. A maior massa residual da amostra revestida está associada a presença da PANI que não volatiliza completamente após a degradação.

#### 4.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Nas Figura 17 é apresentado o comportamento das malhas *spacer*, antes e após o revestimento com concentração de monômero de 0,10 mol/L, no ensaio de tração nas direções das colunas e das fileiras. A Tabela 5, apresenta os valores máximo de tensão e deformação. As amostras não revestidas mostraram tensão média à ruptura de  $3,29 \pm 0,11$  MPa na direção das colunas e de  $3,77 \pm 0,05$  MPa na direção das fileiras. Após o revestimento, esses valores passaram para  $3,78 \pm 0,04$  MPa (colunas) e  $3,76 \pm 0,12$  MPa (fileiras).

Tabela 5 – Concentração de 0,10 mol/L: tensão e deformação máxima da malha *spacer* antes (PES) e após a funcionalização (PES/PANI).

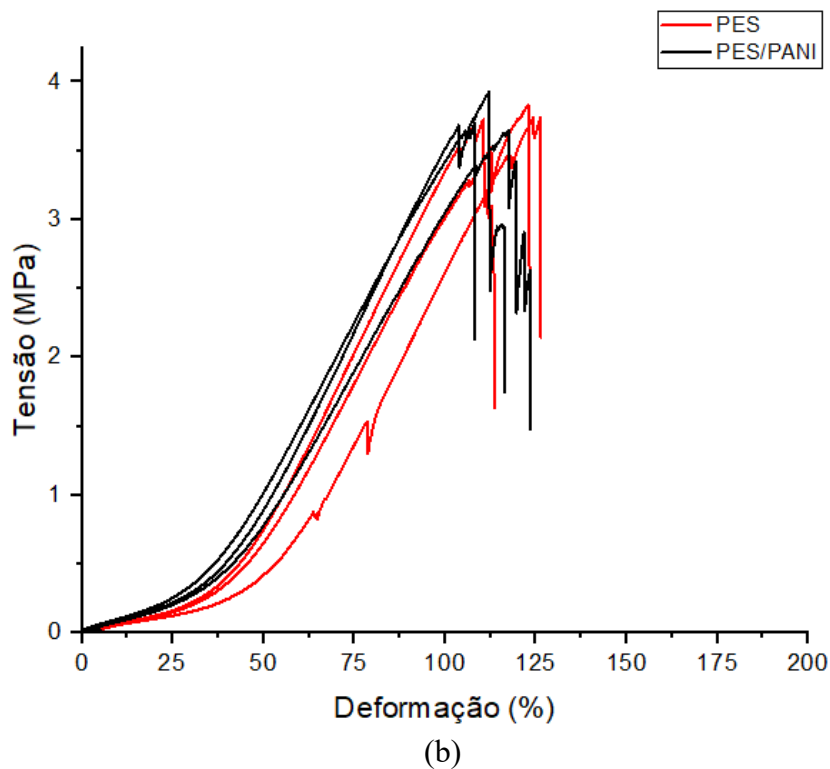
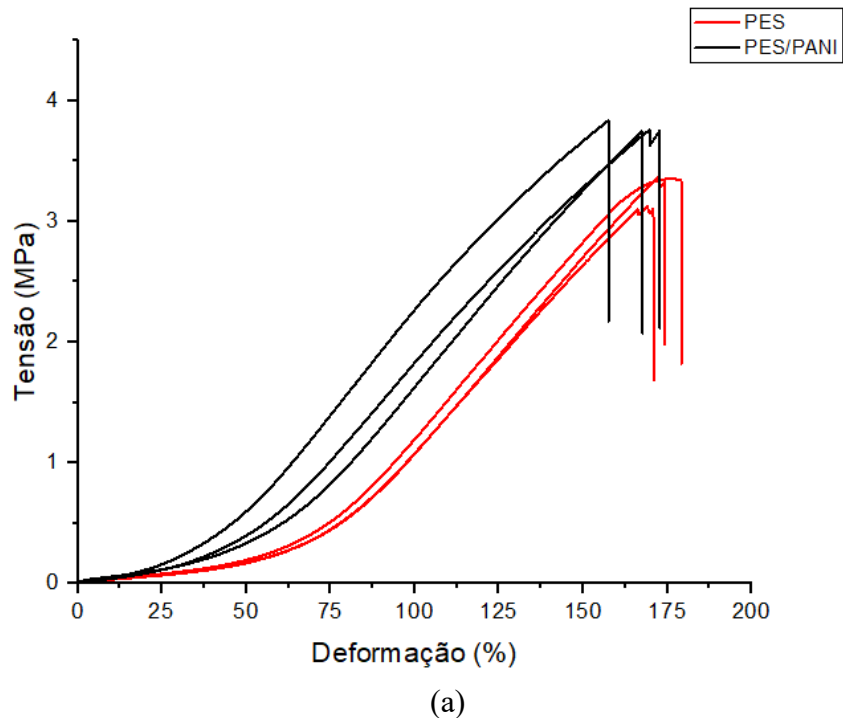
Amostra	Tensão máxima [Mpa]		Deformação [%]	
	Coluna	Fileira	Coluna	Fileira
PES	$3,29 \pm 0,11$	$3,77 \pm 0,05$	$174,19 \pm 4,10$	$121,04 \pm 5,47$
PES/PANI	$3,78 \pm 0,04$	$3,76 \pm 0,12$	$165,92 \pm 6,31$	$116,04 \pm 6,21$

Fonte: Autor (2025).

Observa-se que o revestimento aplicado sobre as malhas *spacer* contribuiu para um aumento na resistência mecânica, na direção das colunas, tendo um aumento de 14,9 %. Esse resultado sugere que o revestimento superficial proporcionou maior coesão estrutural entre os filamentos da malha, favorecendo a redistribuição das tensões durante o ensaio de tração. Por

outro lado, na direção das fileiras, não foram observadas variações significativas nos valores de tensão máxima.

Figura 17 – Curva tensão *versus* deformação da malha *spacer* antes e após funcionalizar, na direção da (a) coluna e (b) fileira com concentração de 0,10 mol/ L de ANI.



Fonte: Autor (2025).

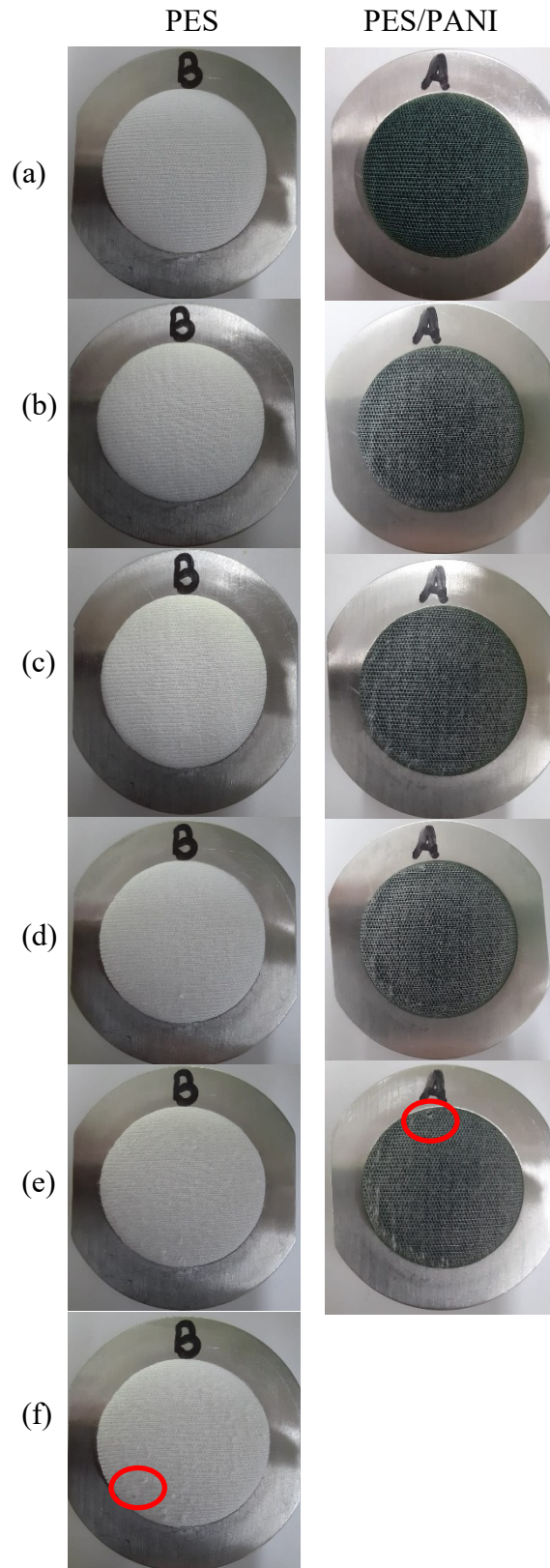
Siqueira, L. (2025) funcionalizou a mesma malha *spacer* com polipirrol. Após o tratamento, obteve-se na direção das colunas um valor de  $3,59 \pm 0,15$  MPa. No entanto, os resultados indicam que a malha funcionalizada com polianilina apresentou desempenho superior nessa direção. Já na direção das fileiras, o polipirrol proporcionou uma tensão máxima de  $4,36 \pm 0,01$  MPa, superando os valores obtidos com a polianilina, o que evidencia que o tipo de funcionalização influencia de forma distinta o comportamento mecânico conforme a orientação da malha. Ressalta-se que não foram encontradas publicações científicas na literatura sobre estudos relacionando malhas revestidas com polianilina que permitissem a comparação direta dos resultados de resistência à tração. Na base de dados Scopus, foram utilizadas como critérios de busca as combinações das palavras-chave “strength” OR “tension” AND “PANI” AND “PES”. No entanto, não foram encontrados artigos relacionados na literatura científica.

A deformação é uma medida da capacidade de um material esticar em resposta a uma força aplicada, sendo expressa em porcentagem. Nos dados apresentados (Tabela 5), observa-se que o material PES possui maior deformação na orientação de coluna ( $174,19\% \pm 4,10$ ) e após a funcionalização PES/PANI apresentou  $165,92 \pm 6,31\%$ . Essa diferença indica que antes da funcionalização o material é mais maleável e apresenta maior ductilidade, o que pode ser vantajoso em aplicações que exigem flexibilidade. A incorporação da PANI tende a tornar o material mais rígido, o que pode favorecer sua utilização em contextos que demandam maior estabilidade dimensional. No sentido da fileira, não foram observadas variações significativas.

#### 4.9 RESISTÊNCIA À ABRASÃO

O ensaio de resistência à abrasão no equipamento Martindale foi realizado pausando o equipamento a cada 1000 ciclos, com objetivo de verificar a existência de alguma alteração na superfície das amostras. A amostra padrão, sem a aplicação da polianilina, apresentou um pequeno furo com 5000 ciclos (Figura 18) e a amostra revestida com PANI [0,10 mol/L] com 4000 ciclos (Figura 18). Dessa forma, observa-se que o revestimento com polianilina reduziu a resistência à abrasão das amostras.

Figura 18 – Resistência à abrasão das amostras sem e com polianilina, após: (a) 0 ciclos; (b) 1000 ciclos; (c) 2000 ciclos; (d) 3000 ciclos; (e) 4000 ciclos; e (f) 5000 ciclos, para as amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/ L de ANI.



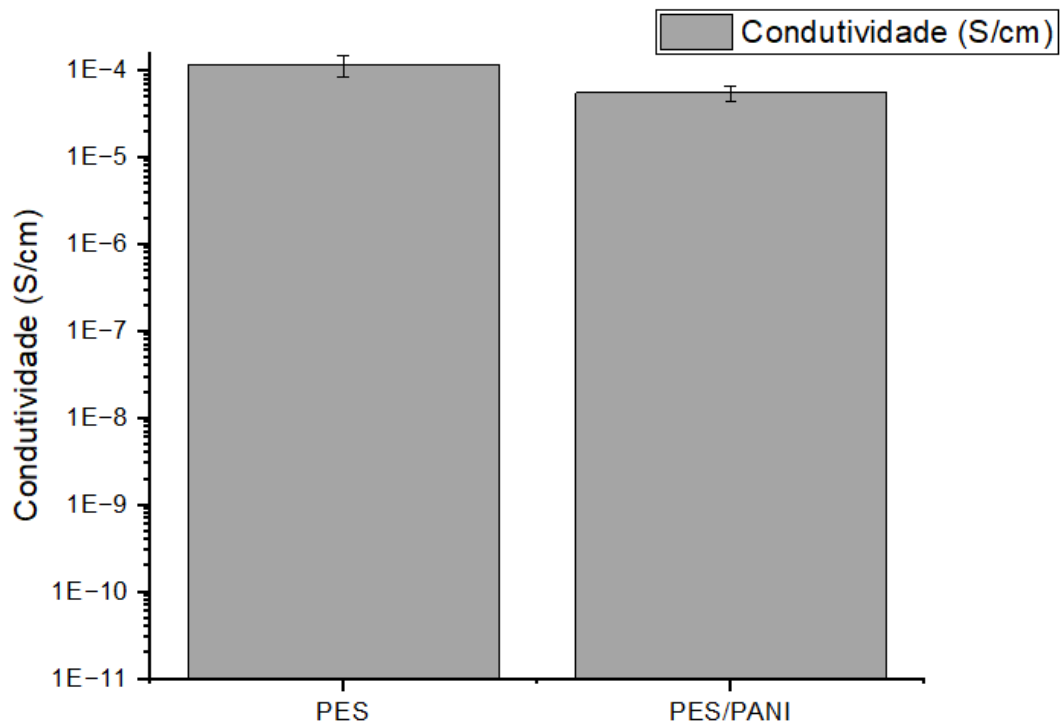
Fonte: Autor (2025).

Realizou-se a pesagem das amostras antes e após o ensaio, a fim de quantificar a perda de massa decorrente do desgaste. Observou-se que a amostra funcionalizada apresentou uma perda média de massa de 0,0010 g, que representa 0,22% da massa inicial, enquanto a amostra não revestida teve uma perda média de 0,0015 g (0,15%). Essa diferença pode ser atribuída, em parte, ao número distinto de ciclos a que cada amostra foi submetida: a revestida passou por 4000 ciclos de abrasão, e a não revestida foi submetida a 5000 ciclos. Quanto maior o número de ciclos, maior tende a ser a perda de massa do material, já que há um aumento da exposição ao desgaste mecânico. Cada ciclo representa uma unidade de atrito que atua sobre a superfície do material, promovendo remoção progressiva de partículas ou degradação da estrutura superficial.

Cave, G. *et al.* (2022) realizaram ensaios de abrasão em algumas malhas *spacer* com diferentes tipos de revestimento por meio do equipamento Martindale. Nesse procedimento, a amostra foi submetida a repetidas fricções até o surgimento de um furo em sua superfície. Os resultados obtidos variaram entre 1000 e 6000 ciclos, dependendo da amostra. O estudo teve como foco a comparação entre diferentes tipos de revestimentos, evidenciando como cada um influencia na resistência ao desgaste. Siqueira L. (2024) revestiu uma malha *spacer* com polipirrol e submeteu a amostra ao ensaio de abrasão Martindale, realizando 10000 ciclos. Por meio de análise visual, foi possível perceber que a amostra funcionalizada apresentou desgaste mais acentuado em comparação à amostra não funcionalizada. Ressalta-se ainda que foi realizada uma busca intensa por artigos científicos. Na base de dados Scopus, foram utilizadas como critérios de busca as combinações das palavras-chave “Martindale” AND “PANI”. No entanto, não foram encontrados artigos relacionados na literatura científica.

Na sequência, foi conduzido o ensaio de condutividade elétrica, com o intuito de verificar se a abrasão influencia nas propriedades elétricas do material. É possível observar na Figura 19, uma redução de uma ordem de grandeza na condutividade elétrica após 4000 ciclos do ensaio de abrasão, passando de  $1,17 \times 10^{-4}$  S/cm para  $5,56 \times 10^{-5}$  S/cm. O ensaio de abrasão promove desgaste superficial por atrito contínuo, o que pode remover parte do revestimento condutor aplicado sobre o tecido. Esse processo também pode romper ou danificar fibras condutoras, interrompendo os trajetos elétricos formados. Como resultado, há uma redução na condutividade elétrica devido à perda de continuidade na rede condutora.

Figura 19 – Condutividade elétrica antes e após o ensaio de abrasão para as amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/ L de ANI



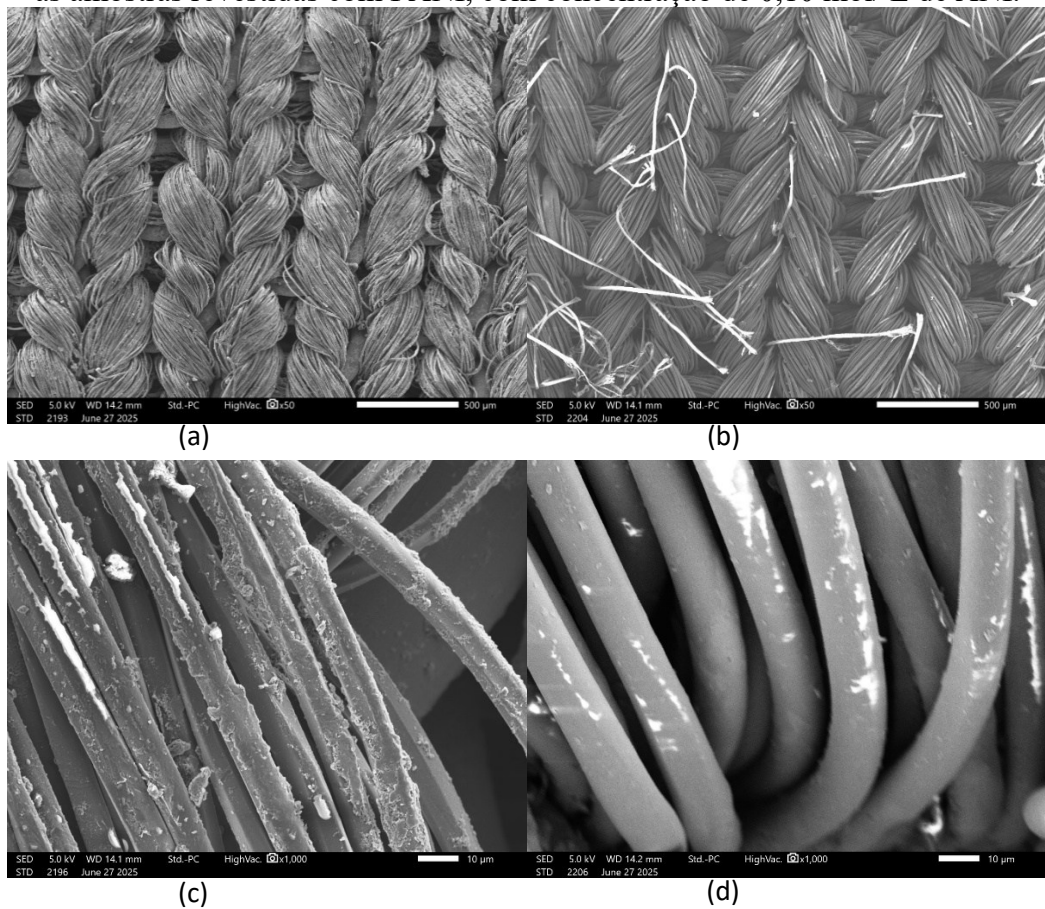
Fonte: Autor (2025).

A Figura 20 apresenta as micrografias de MEV, a partir das quais é possível observar mudanças morfológicas expressivas no material têxtil após o ensaio de abrasão de 4000 ciclos. Observa-se que, antes do ensaio (Figura 18(a)), as fibras condutoras mantêm uma estrutura coesa e contínua, favorecendo a formação de caminhos condutores eficientes ao longo da superfície do tecido. Essa organização estrutural é essencial para garantir elevados níveis de condutividade elétrica, uma vez que reduz a resistência de contato entre as fibras funcionalizadas. Entretanto, após a abrasão (Figura 18 (b)), as micrografias revelam a presença de danos significativos, incluindo rompimento de fibras. Esses efeitos deterioram a integridade dos caminhos condutores, interrompendo ou dificultando a passagem da corrente elétrica, o que justifica a redução da condutividade do material. Portanto, a análise simultânea da morfologia e da condutividade após esforços mecânicos é fundamental para avaliar a viabilidade do uso desses materiais em condições reais de desgaste.

Além dos danos estruturais observados nas fibras, é possível verificar na Figura 18 (c) e (d) a remoção da camada condutora de polianilina após o ensaio de abrasão, que representa um fator determinante na queda de desempenho elétrico do material. A polianilina, quando aplicada como revestimento condutor, forma uma camada responsável por estabelecer os

caminhos de condução. No entanto, a ação abrasiva promove a remoção do revestimento, expondo áreas não funcionalizadas e interrompendo a continuidade elétrica da superfície, deixando lacunas relacionadas a condução que comprometem a eficiência do transporte de carga. A remoção da camada condutora não apenas reduz a condutividade, mas também reduz a vida útil do material em aplicações práticas.

Figura 20 – MEV a) antes (ampliação de 50x) e b) após o ensaio de abrasão (ampliação de 50x); b) antes (ampliação de 1000x) e b) após o ensaio de abrasão (ampliação de 1000x) para as amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/ L de ANI.



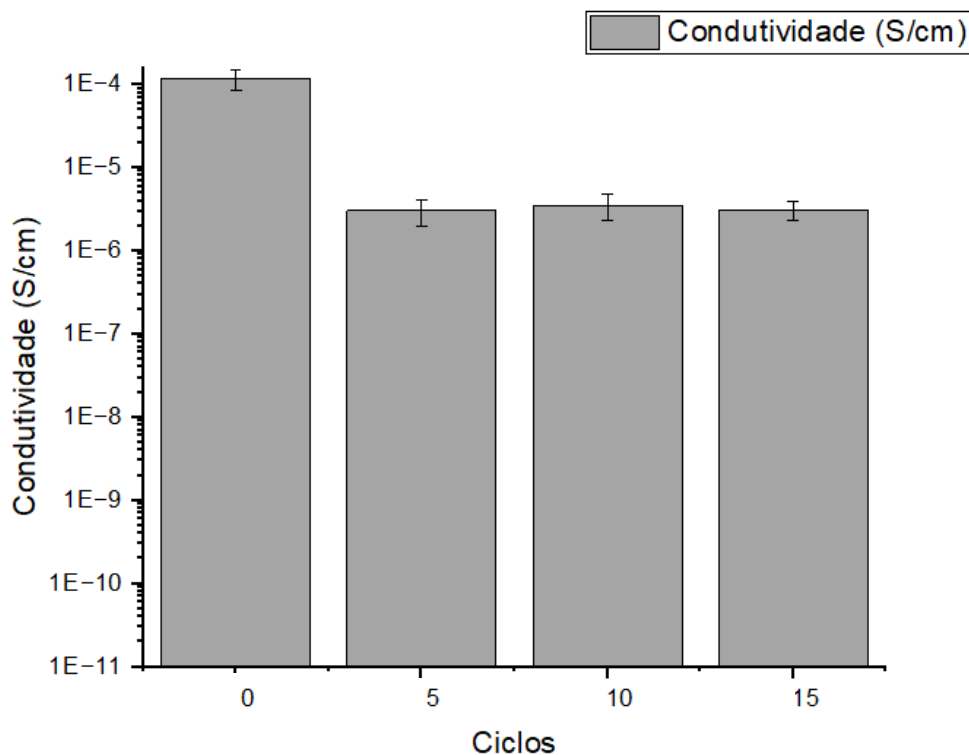
Fonte: Autor (2025).

#### 4.10 SOLIDEZ À LAVAGEM

Para o ensaio de solidez à lavagem foram realizados ciclos de 5, 10 e 15 lavagens, com o objetivo de avaliar a durabilidade do substrato quando submetido aos processos de lavagem convencionais. Este ensaio é fundamental para verificar como o material reage à água, detergentes e ciclos de lavagem, que afetam diretamente a sua funcionalidade ao longo do tempo.

É possível observar na Figura 21, uma redução na condutividade elétrica do substrato após o ensaio de solidez à lavagem, porém verifica-se que, independentemente do número de ciclos, o valor da condutividade elétrica ficou similar, considerando os desvios. Inicialmente, a amostra que não foi lavada apresentou o maior valor de condutividade, média  $1,17 \times 10^{-4}$  S/cm, conforme apresentado anteriormente. No entanto, após 15 ciclos de lavagem, o valor médio é reduzido para  $3,08 \times 10^{-6}$  S/cm. Esse comportamento sugere que o processo de lavagem promove a remoção da PANI, responsável pela condutividade.

Figura 21 – Condutividade elétrica após os ensaios de lavagem em diferentes ciclos, para as amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/L de ANI



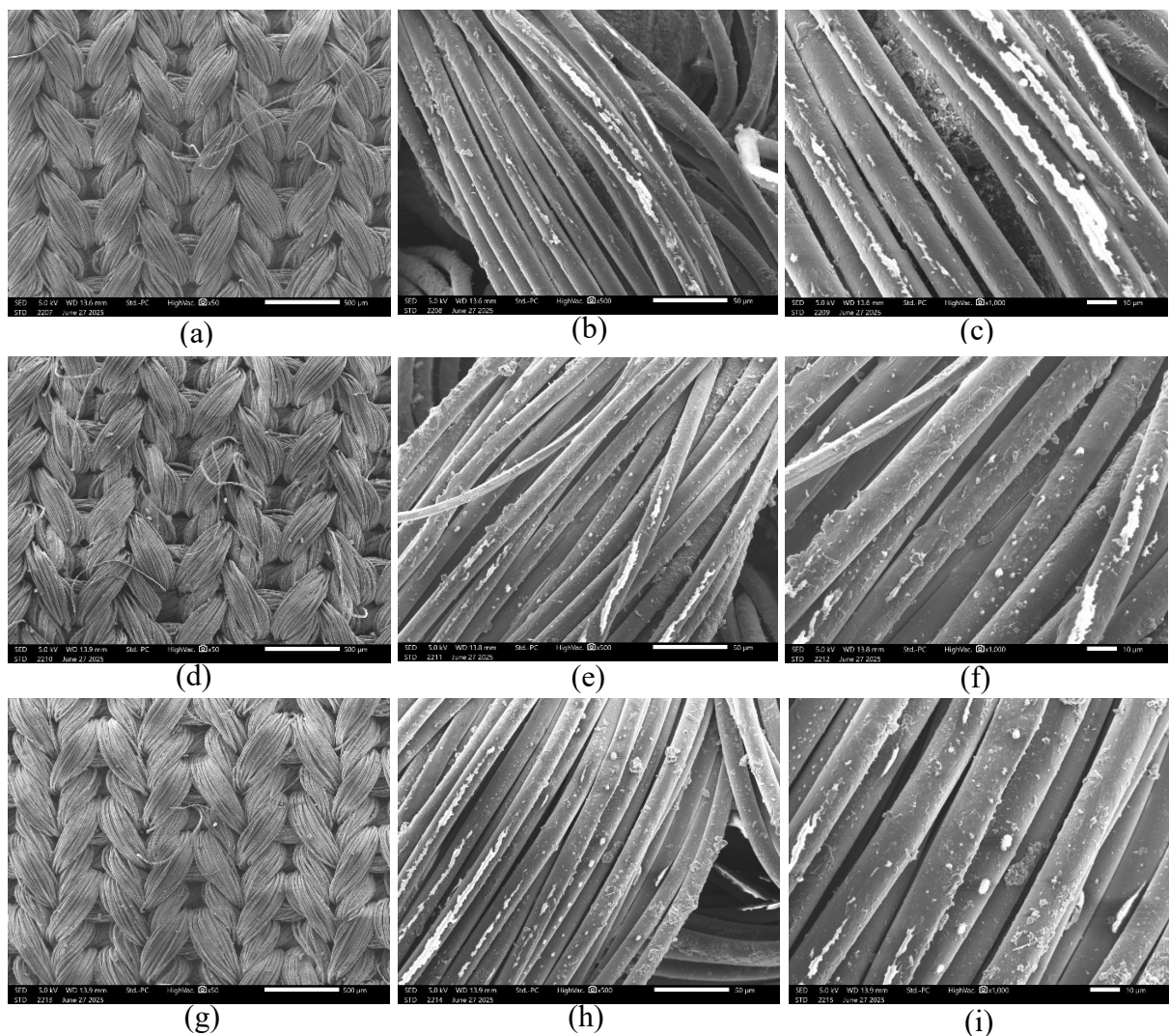
Fonte: Autor (2025).

Além disso, a polianilina dopada, cuja forma condutora é o sal de esmeraldina, pode estar sofrendo o processo de desdopagem em contato com a água, convertendo-se em sua forma base de esmeraldina, que não é condutora. A perda de dopantes ácidos ao longo dos ciclos de lavagem compromete diretamente a continuidade dos caminhos condutores no substrato têxtil. Como alternativa para reduzir esse problema, recomenda-se a aplicação de um tratamento prévio de hidrólise alcalina no substrato têxtil, conforme proposto por Aizamddin e Mahat (2023). Esse processo aumenta a hidrofobicidade e a afinidade química entre o tecido e a polianilina, promovendo maior retenção dos dopantes e, conseqüentemente, maior estabilidade da condutividade elétrica mesmo após múltiplos ciclos de lavagem. Os resultados mostraram

que os tecidos tratados mantiveram condutividade elétrica estável ( $\sim 10^{-3}$  S/cm) mesmo após 10 ciclos de lavagem, enquanto os tecidos não tratados apresentaram queda de três ordens de magnitude.

As micrografias obtidas por MEV, apresentadas na Figuras 22, com ampliações de 50x, 500x e 1000x, das amostras de 0,10 mol/L lavadas após 5, 10 e 15 ciclos, revelaram morfologias visualmente semelhantes entre si, justificando o resultado de condutividade.

Figura 22 – MEV das amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/L de ANI, submetidas ao ensaio de lavagem com diferentes ciclos: (a, b, c) 5 ciclos, (c, d, e) 10 ciclos e (f, g, h) 15 ciclos. Ampliação de a)50x, b)500x e c)1.000x.

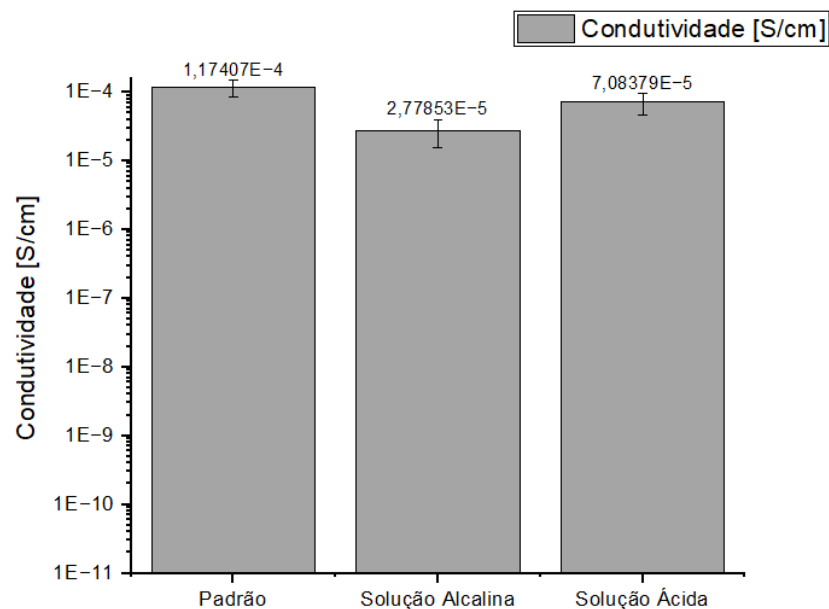


Fonte: Autor (2025).

#### 4.11 SOLIDEZ AO SUOR

O substrato têxtil pode ser submetido à exposição de diferentes agentes químicos, como por exemplo, ao suor. A estabilidade da condutividade elétrica de tecidos revestidos com PANI pode ser influenciada pela exposição a soluções que simulem o suor ácido e alcalino. A Figura 23 apresenta os valores de condutividade elétrica, da amostra com concentração de 0,10 mol/L, em ambos os tipos de suor (ácido e alcalino). O suor alcalino, por apresentar pH elevado e presença de íons hidroxila, ocorre a perda dos íons dopantes ácidos responsáveis pela forma condutora do polímero, levando à redução da capacidade de condução elétrica (Mazzara *et al.*, 2021). Por outro lado, as amostras submetidas a solidez ao suor ácido, também apresentaram uma redução na condutividade. Entretanto, os valores ficaram mais próximos à condutividade das amostras padrão (antes do ensaio de resistência ao suor). Esse melhor resultado ocorre pelo fato de que os ambientes ácidos favorecem a manutenção da dopagem da PANI, preservando sua estrutura condutora.

Figura 23 – Condutividade elétrica das amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/L de ANI, antes e após os ensaios de solidez ao suor.



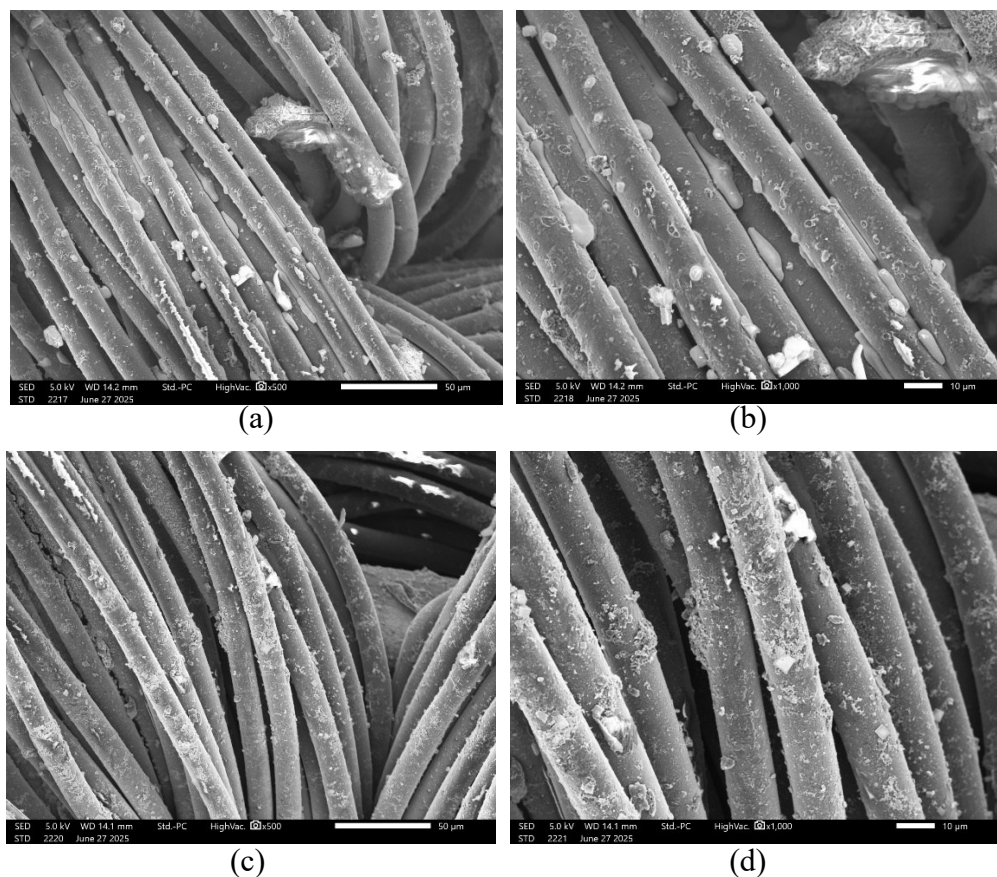
Fonte: Autor (2025).

A Figura 24 (a-b) apresenta as micrografias de MEV da amostra com concentração de 0,10 mol/L de ANI submetida a resistência ao suor alcalino. Observa-se uma significativa desorganização da camada condutora, com evidências visíveis da perda de homogeneidade,

contribuindo para a redução de condutividade. Por outro lado, a Figura 24 (c-d) referente às amostras expostas ao suor ácido, revela uma estrutura superficial mais contínua e homogênea. Além disso, a integridade da camada de PANI parece relativamente preservada.

Ambos os tipos de suor interferiram na estabilidade da camada condutora de PANI. Tais resultados reforçam a importância em se utilizar estratégias protetivas, com o objetivo de preservar o desempenho dos têxteis inteligentes com PANI em condições reais de uso quando em contato com o corpo humano. Nesse sentido, Yang *et al.* (2025) estudaram a aplicação de uma camada de  $\text{Ti}_3\text{CNT}_x\text{-MXene}$  funcionalizado com silanos fluorados, criando uma superfície hidrofóbica que repele o suor e impede a oxidação da PANI.

Figura 24 – MEV das amostras revestidas com PANI, com concentração de 0,10 mol/ L de ANI, submetidas ao ensaio de (a, b) suor alcalino e (c,d) suor ácido, ampliação de (a,c) 500x e (b,d)1000x.



Fonte: Autor (2025).

## 5 CONCLUSÃO

Os ensaios realizados demonstraram que a funcionalização da malha *spacer* com polianilina foi eficaz em conferir propriedades condutoras ao material, com destaque para a correlação entre a concentração de anilina e o aumento da condutividade elétrica. A baixa dispersão dos dados e a reprodutibilidade do processo indicam consistência metodológica e potencial para aprimoramentos futuros. A análise morfológica por MEV confirmou a deposição da polianilina sobre as fibras, com maior homogeneidade nas concentrações intermediárias e elevadas, sendo a concentração de 0,10 mol/L a mais adequada em termos de uniformidade da cobertura e ausência de acúmulo excessivo.

O ensaio eletromecânico revelou que concentrações mais elevadas de polianilina proporcionam maior estabilidade e responsividade elétrica sob compressão. Em contrapartida, concentrações mais baixas mostraram instabilidade significativa, podendo comprometer a aplicação em sensores têxteis. No ensaio de resistência à tração, observou-se um aumento de aproximadamente 15% na tensão máxima na direção das colunas após a funcionalização, sugerindo maior coesão entre os filamentos. A deformação foi ligeiramente reduzida, indicando maior rigidez do material.

A espectroscopia FTIR confirmou a presença de grupos funcionais característicos da polianilina, validando a incorporação do revestimento à malha. Já a análise térmica por DSC revelou alterações na Tg e Tf, indicando interações estruturais promovidas pela PANI que modificam a estabilidade térmica do material. O ensaio de TGA demonstrou que a malha funcionalizada apresenta menor resistência térmica, porém menor perda de massa em temperaturas elevadas, devido à PANI que não volatiliza completamente após a degradação.

O ensaio de resistência à abrasão evidenciou falhas após 4.000 ciclos e perda de condutividade elétrica em uma ordem de grandeza. As micrografias mostraram a remoção da camada condutora, apontando para a necessidade de estratégias que aumentem a adesão da polianilina ao substrato têxtil. O ensaio de solidez à lavagem indicou diminuição da condutividade após múltiplos ciclos, atribuída à desdopagem da polianilina em contato com a água; apesar disso, a amostra manteve níveis satisfatórios de condutividade. A exposição aos suores ácido e alcalino resultou em redução da condutividade elétrica, sendo o suor alcalino o mais impactante, por promover maior desorganização da camada condutora. De modo geral, os resultados demonstram que a funcionalização com PANI apresenta grande potencial para aplicações em têxteis inteligentes, com bom desempenho frente aos ensaios de solidez à lavagem, resistência à tração, suor e resposta eletromecânica.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, foram identificadas as seguintes oportunidades para dar continuidade ao estudo:

- a) Otimização da adesão da polianilina ao substrato têxtil: investigar diferentes métodos de pré-tratamento da malha (como plasma, funcionalização química ou aplicação de *primers*) para melhorar a fixação da polianilina e aumentar a resistência à abrasão e à lavagem.
- b) Estudo de dopantes alternativos para maior estabilidade elétrica.
- c) Desenvolvimento de estruturas têxteis híbridas: combinar a malha funcionalizada com outros materiais condutores (como fios metálicos ou fibras de carbono).
- d) Integração com sistemas eletrônicos vestíveis: projetar protótipos de sensores têxteis baseados na malha funcionalizada, integrando-os com microcontroladores para monitoramento de sinais fisiológicos (pressão, movimento, respiração) em tempo real.

## 7 REFERÊNCIAS

ABILEVITCH, Lihi *et al.* Polyaniline for Smart Textile Applications. **Trends and Developments in Modern Applications of Polyaniline**, 2023.

ABIT. Perfil do Setor, 2023. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>. Acesso em: 04 de novembro de 2023.

AMARAL, A. E. B. **Impacto do comprimento da laçada, ponto flutuante e composição no comportamento mecânico em tecidos de malha piquet duplo via fatorial e superfície 3D.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.

AMINI, Sebghatullah *et al.* Polyaniline-Doped Textile-Based Triboelectric Nanogenerator: Self-Powered Device for Wearable Electronics. **Applied Research**, v. 4, n. 1, p. e202400124, 2025.

ANDRADE, A. T. **Reutilização de banhos de tingimento de poliéster em batelada com corantes dispersos.** Dissertação de mestrado, 2018.

ANDRADE, J. S. N. **Avaliação de desgaste mecânico em agulhas de lingueta aplicadas em tear circular.** Dissertação de Mestrado, 2022.

ANDRE, Ivan Carlos. Uso de resíduo de couro como suporte da polianilina realizado via polimerização in situ. Dissertação de mestrado, 2023.

ANWER, Shahnawaz *et al.* Test-retest reliability, validity, and responsiveness of a textile-based wearable sensor for real-time assessment of physical fatigue in construction bar-benders. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103348, 2021.

AIZAMDDIN, M. F., & MAHAT, M. M. Enhancing the Washing Durability and Electrical Longevity of Conductive Polyaniline-Grafted Polyester Fabrics. **ACS Omega**, 8, 37936–37947, 2023.

BHATTACHARYA, S. S.; CHAUDHARI, S. B. Study on structural, mechanical and functional properties of polyester silica nanocomposite fabric. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, v. 21, n. 1, p. 43, 2014.

CABALLERO-CALERO, Olga et al. Flexible polyester-embedded thermoelectric device with Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> and Te legs for wearable power generation. **Applied Materials Today**, v. 41, p. 102458, 2024.

CAMLIBEL, Nurhan O.; KANDOLA, Baljinder K. Highly sensitive textile pressure sensors with novel hierarchical architecture based on conductive polymers, silver nanoparticles and carbon nanotubes. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 382, p. 116166, 2025.

CARVALHO, J. G. **Tratamentos Térmicos e corona em tecido de poliéster**. Dissertação de mestrado, 2011.

CAVE, Grayson L. et al. Novel 3-D Spacer Textiles to Protect Crops from Insect Infestation and That Enhance Plant Growth. **Agriculture**, v. 12, n. 4, p. 498, 2022.

CAYA, M. V. *et al.* Development of conductive thread heating element on wireless heating e-textile belt for thermotherapy application. **Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije**, v. 62, n. 3-4, p. 293-299, 2021.

CHEN, Guorui et al. Smart textiles for electricity generation. **Chemical Reviews**, v. 120, n. 8, p. 3668-3720, 2020.

CHEN, Junli *et al.* Review of textile-based wearable electronics: From the structure of the multi-level hierarchy textiles. **Nano Energy**, p. 108898, 2023.

CHOI, Seungyeop *et al.* Wearable Photomedicine for Neonatal Jaundice Treatment Using Blue Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs): **Toward Textile-Based Wearable Phototherapeutics**. **Advanced Science**, v. 9, n. 35, p. 2204622, 2022.

CONTI, Tábata Morgana. **Reaproveitamento de resíduos de tecido de poliéster da indústria do calçado em palmilhas**. Dissertação de mestrado, 2021.

DADJOU, Mahsa et al. Towards seamless conformable and comfortable wearable electronics: Polyimide-supported dry electrodes integrated in knitted fabrics. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 376, p. 115613, 2024.

DE OLIVEIRA, C. R. S., DA SILVA JÚNIOR, A. H., IMMICH, A. P. S., & FIATES, J.. Use of advanced materials in smart textile manufacturing. **Materials Letters**, v. 316, p. 132047, 2022.

DEJENE, Bekinew Kitaw; GUDAYU, Adane Dagnaw. Exploring the potential of 3D woven and knitted spacer fabrics in technical textiles: A critical review. **Journal of Industrial Textiles**, v. 54, p. 15280837241253614, 2024.

DI TOCCO, Joshua *et al.* Wearable device based on a flexible conductive textile for knee joint movements monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 23, p. 26655-26664, 2021.

DING, Yichun *et al.* Porous conductive textiles for wearable electronics. **Chemical reviews**, v. 124, n. 4, p. 1535-1648, 2024.

DOS SANTOS, Cochiran Pereira. **Proposta experimental para a determinação da resistividade elétrica de materiais e seu comportamento em função da temperatura**. Tese de Doutorado. Universidade Tiradentes, 2023.

FERREIRA, A. J. S. *et al.* Malharia. In: AGUIAR, C.R.L. **Engenharia Têxtil- Uma abordagem simplificada**. Florianópolis: Editora UFSC, 2022. P. 107 – 130.

GALLI, Valeria *et al.* Passive and Wireless All-Textile Wearable Sensor System. **Advanced Science**, v. 10, n. 22, p. 2206665, 2023.

GAUCHE, H. *et al.* Screen Printing of Cotton Fabric with Hydrochromic Paste: Evaluation of Color Uniformity, Reversibility and Fastness Properties. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, 2020.

GRANCARIĆ, Ana M. *et al.* Conductive polymers for smart textile applications. **Journal of Industrial Textiles**, v. 48, n. 3, p. 612-642, 2018.

GUETHS, Camila Petters *et al.* **Desenvolvimento de têxteis condutores a partir de malha spacer por trama**. Trabalho de conclusão de curso, 2023.

HE, Hualing *et al.* Temperature-arousing self-powered fire warning e-textile based on p–n segment coaxial aerogel fibers for active fire protection in firefighting clothing. **Nano-micro letters**, v. 15, n. 1, p. 226, 2023.

HE, Wenya *et al.* Textile-based moisture power generator with dual asymmetric structure and high flexibility for wearable applications. **Nano Energy**, v. 95, p. 107017, 2022.

HASSABO, A. G. *et al.* Chromic dyes for smart textile: A review. **Letters in Applied NanoBioScience**, v. 12, n. 4, 2023.

HASSAN, MA *et al.* Engineered polyethersulfone UF membranes with sulfonated polyaniline-graphene oxide: Optimizing permeability and antifouling. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 2, p. 115988, 2025.

IMMICH, A. P. S. *et al.* Fibras. *In*: AGUIAR, C.R.L. **Engenharia Têxtil- Uma abordagem simplificada**. Florianópolis: Editora UFSC, 2022. P. 23 – 75.

JEONG, Y. R. *et al.* Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensors Using Fragmentized Graphene Foam. **Advanced Functional Materials**, v. 25, n. 27, p. 4228–4236, 2015.

JIANG, C.; WANG, K.; LIU, Y.; ZHANG, C.; WANG, B. Application of textile technology in tissue engineering: A review. **Acta Biomaterialia**, v. 128, p. 60-76, 2021.

KOMOLAFE, Abiodun *et al.* E-textile technology review—from materials to application. **Ieee Access**, v. 9, p. 97152-97179, 2021.

KONG, Yue *et al.* Multifunctional flame-retardant cotton fabric with hydrophobicity and electrical conductivity for wearable smart textile and self-powered fire-alarm system. **Chemical Engineering Journal**, v. 487, p. 150677, 2024.

LEE, Ching *et al.* Intelligent Thermochromic Heating E-Textile for Personalized Temperature Control in Healthcare. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 17, n. 3, p. 5515-5526, 2025.

LI, Mufang *et al.* Large-Area, Wearable, Self-Powered Pressure–Temperature Sensor Based on 3D Thermoelectric Spacer Fabric. **Sensores ACS**, v. 5, n. 8, p. 2545-2554, 2020.

LIMA, C. N. D. **Otimização do processo de tingimento da fibra de poliéster utilizando cumarina como carrier**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020.

LIN, Jui-Chi; LIATISIS, Panos; ALEXANDRIDIS, Paschalis. Flexible and stretchable electrically conductive polymer materials for physical sensing applications. **Polymer Reviews**, v. 63, n. 1, p. 67-126, 2023.

LIN, Xiaoping *et al.* Design and construction of 1D/2D/3D fabric-based wearable micro-supercapacitors. **Journal of Power Sources**, v. 560, p. 232712, 2023.

- MACHADO, Amanda Louise et al. Aplicação de compósitos PANI: SWCNTS em sensores de pressão. 2024. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.ors. **Journal of Power Sources**, v. 560, p. 232712, 2023.
- MAESTRI, G.; FERREIRA, L. B.; BACHMANN, P.; PAIM, A. A.; MERLINI, C.; STEFFENS, F.. Recent advances in piezoelectric textile materials: A brief literature review. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 18, 2023.
- MARTINS, E. L. B. Laçando a história: **um estudo sobre a criação de artigos de vestuário em malharia circular**. Dissertação de mestrado, 2016.
- MARTINS, João et al. Integrating sEMG and IMU Sensors in an e-textile smart vest for forward posture monitoring: first steps. **Sensors**, v. 24, n. 14, p. 4717, 2024.
- MAZZARA, Francesca et al. PANI-based wearable electrochemical sensor for pH sweat monitoring. **Chemosensors**, v. 9, n. 7, p. 169, 2021.
- MCCORD, Maryam R. Yazdani et al. Da baixa condutividade à alta eficiência energética: O papel dos polímeros condutores em materiais de mudança de fase. **Chemical Engineering Journal** , v. 508, p. 160804, 2025.
- MENEZES, P. L, **Desenvolvimento e caracterização de um compósito polimérico reforçado com resíduos têxteis de tecido de Juta e malha de poliéster**. Dissertação de mestrado, 2018.
- MERLINI, Claudia et al. Electrically conductive polyaniline-coated electrospun poly (vinylidene fluoride) mats. **Frontiers in Materials**, v. 2, p. 14, 2015.
- MIAN, Sajjad Hussain et al. A Novel Textile-Embedded Wearable Microwave Sensor for Non-Invasive Sweat Glucose Monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2025.
- MIAO, Fen et al. Wearable sensing, big data technology for cardiovascular healthcare: current status and future prospective. **Chinese Medical Journal**, v. 136, n. 9, p. 1015-1025, 2023.
- MOTIEPOR, Kourosh et al. Stretchable clutter-free E-textile EEG cap: Advancing seamless wearable solutions for emerging neuroimaging applications. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 387, p. 116454, 2025.

NIKOLOVA, Elena; GANEV, Borislav; GIEVA, Elitsa. Wearable intelligent textile suits for telemetry monitoring in pediatrics. In: **2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET)**. IEEE, 2021. p. 1-6.

NIMRA, S. Sadia et al. Electrically conductive fibers fabrication and characterization via in-situ polymerization of aniline for the protection against EMI and thermal imaging signals. **journal of materials research and technology**, v. 23, p. 2399-2409, 2023.

OLIVEIRA, C. R. S. **Desenvolvimento e caracterização de sensores em malhas de algodão e poliéster utilizando polianilina condutora e grafite**. Dissertação de mestrado, 2015.

ONGGAR, Toty; KRUPPKE, Iris; CHERIF, Chokri. Techniques and processes for the realization of electrically conducting textile materials from intrinsically conducting polymers and their application potential. **Polymers**, v. 12, n. 12, p. 2867, 2020.

OUYANG, J. Recent advances of intrinsically conductive polymers. **Acta Phys.-Chim. Sin**, v. 34, n. 11, p. 1211-1220, 2018.

PAN, Hong et al. Biodegradable cotton fiber-based piezoresistive textiles for wearable biomonitoring. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 222, p. 114999, 2023.

PENG, Yidong et al. Thermally comfortable epidermal bioelectrodes based on ultrastretchable and passive radiative cooling e-textiles. **Nano Energy**, v. 120, p. 109143, 2024.

PODDAR, Akhil K.; PATEL, Siddharth S.; PATEL, Hitesh D. Synthesis, characterization and applications of conductive polymers: A brief review. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 32, n. 12, p. 4616-4641, 2021.

QI, Xiangjun *et al.* Underwater sensing and warming E-textiles with reversible liquid metal electronics. **Chemical Engineering Journal**, v. 437, p. 135382, 2022.

RAVICHANDRAN, Vignesh *et al.* Itex gloves: Design and in-home evaluation of an E-textile glove system for tele-assessment of Parkinson's disease. **Sensors**, v. 23, n. 6, p. 2877, 2023.

RAY, Sadhan C. (Ed.). **Fundamentals and advances in knitting technology**. CRC Press, 2012.

SANCHES, R. A., ROCHA, R. B., & DUARTE, A. Y. S. Reciclagem de resíduos sólidos têxteis: Proposta de fabricação de tecido de malha, utilizando como matéria-prima aparas de

tecidos, malhas e não tecidos descartadas pelas indústrias de confecções de Ibitinga. **Engenharia, Gestão e Inovação**, Volume 3, 33, 2022.

SHAH, M. A.; PIRZADA, B. M.; PRICE, G.; SHIBIRU, A. L.; QURASHI, A. Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review. **Journal of Advanced Research**, v. 38, p. 55-75, 2022.

SHAHID, Md Abdus et al. Avanços em eletrônica flexível baseada em polímeros condutores para aplicações multifuncionais. *Journal of Composites Science*, v. 9, n. 1, p. 42, 2025.

SHAKIR, HM Fayzan et al. Fabrication and EMI (electromagnetic interference) shielding performance of polyester fabrics coated with polyaniline via in-situ polymerization. **Materials Today Communications**, v. 37, p. 106971, 2023.

SHAO, Yiqin et al. Characteristics of electrical heating and sensing properties for CNTs/GNs polyester-knitted fabrics based on network structure. **Fibers and Polymers**, v. 24, n. 3, p. 1139-1148, 2023.

SIQUEIRA, Lissa Machado et al. Malha spacer e polipirrol: uma abordagem para o desenvolvimento de têxteis inteligentes condutores. 2024.

SIMEGNAW, A. A.; MALENGIER, B.; ROTICH, G.; TADESSE, M. G.; VAN LANGENHOVE, L. Review on the Integration of Microelectronics for E-Textile. **Materials**, v. 14, n. 17, p. 5113, 2021.

SIMON, Lucas et al. Desenvolvimento de nanocompósito eletrofiado de poli (fluoreto de vinilideno) com nanoplacas de grafeno funcionalizadas com líquido iônico por método não-covalente para aplicação em sensores de compressão piezoresistivos. Dissertação de Mestrado, 2022.

SOFRONOVA, Daniela; ANGELOVA, Radostina A.; SOFRONOV, Yavor. Design and Development of an E-Textile Mat for Assuring the Comfort of Bedridden Persons. **Materials**, v. 14, n. 18, p. 5437, 2021.

SUN, X.; FU, J. H.; TENG, C.; ZHANG, M.; LIU, T.; GUO, M.; LIU, J. Superhydrophobic E-textile with an Ag-EGaIn conductive layer for motion detection and electromagnetic

interference shielding. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 14, n. 29, p. 33650-33661, 2022.

TANG, Chenyu et al. Ultrasensitive textile strain sensors redefine wearable silent speech interfaces with high machine learning efficiency. **npj Flexible Electronics**, v. 8, n. 1, p. 27, 2024.

TEKMEDASH, Mohadese Irani; EZAZSHAHABI, Nazanin; ASAYESH, Azita. The influence of fabric structure on the static and dynamic compressional performance of weft-knitted spacer fabrics. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, v. 29, n. 2, p. 1-19, 2025.

TIAN, Bin et al. Fully printed stretchable and multifunctional E-textiles for aesthetic wearable electronic systems. **Small**, v. 18, n. 13, p. 2107298, 2022.

VERONEZI, P. O. **Desenvolvimento de sensores flexíveis de umidade utilizando polianilina dopada com HCl e HNO<sub>3</sub>**, 2014.

WANG, Chenlu; SONG, Hayoung. Study on Motion Sensing Using Textile Electrodes-Focusing on the Application of PANI Conductive Material. **Fibres & Textiles in Eastern Europe**, v. 32, n. 2, p. 1-16, 2024.

WANG, Yuting *et al.* Multifunctional E-textiles based on biological phytic acid-doped polyaniline/protein fabric nanocomposites. **Advanced Materials Technologies**, v. 6, n. 6, p. 2100003, 2021.

Wiederhold, A; Gundler, C. Monitoring Hypomimia in Parkinson's Disease Using an E-Textile, 2025.

XU, Ruidong *et al.* Breathable kirigami-shaped ionotronic e-textile with touch/strain sensing for friendly epidermal electronics. **Advanced Fiber Materials**, v. 4, n. 6, p. 1525-1534, 2022.

YANG, Hui *et al.* Surface Functionalized Ti<sub>3</sub>CNT<sub>x</sub> MXene for Monitoring Sweat pH with Superhydrophobic Protection. **Advanced Materials Interfaces**, v. 12, n. 11, p. 2400969, 2025.

YAN, Jing et al. Thermally robust hierarchical nanofiber triboelectric yarns for efficient energy harvesting in firefighting E-textiles. **Chemical Engineering Journal**, v. 499, p. 156188, 2024.

YANG, Yiduo *et al.* Programmable and scalable embroidery textile resistive pressure sensors for integrated multifunctional smart wearable systems. **Advanced Fiber Materials**, v. 7, n. 2, p. 574-586, 2025.

YIP, J.; NG, S. Study of three-dimensional spacer fabrics:Physical and mechanical properties. **Journal of materials processing technology**, v. 206, n. 1-3, p. 359-364, 2008.

ZENG, Xianghui *et al.* Highly conductive carbon-based e-textile for gesture recognition. **IEEE Electron Device Letters**, v. 44, n. 5, p. 825-828, 2023.

ZHANG, Ying *et al.* Wearable alternating current electroluminescent e-textiles with high brightness enabled by fully sprayed layer-by-layer assembly. **Advanced Functional Materials**, v. 34, n. 4, p. 2308969, 2024.

ZHAO, Zhiqi *et al.* Washable patches with gold nanowires/textiles in wearable sensors for health monitoring. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 14, n. 16, p. 18884-18900, 2022.