



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
DEPARTAMENTO ENGENHARIA TÊXTIL
CURSO ENGENHARIA TÊXTIL

Ágata de Queiroz Freitas

**Investigação da durabilidade e desempenho condutor de malhas têxteis
revestidas com polipirrol sob simulação de uso**

Blumenau

2025

Ágata de Queiroz Freitas

**Investigação da durabilidade e desempenho condutor de malhas têxteis
revestidas com polipirrol sob simulação de uso**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Têxtil Centro ou Campus Blumenau Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Têxtil.

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

Blumenau

2025

Ficha Catalográfica Gerada Por Meio De Sistema Automatizado Gerenciado Pela Bu/Ufsc. Dados Inseridos Pelo Próprio Autor.

Freitas, Ágata de Queiroz

Investigação da durabilidade e desempenho condutor de malhas têxteis revestidas com polipirrol sob simulação de uso / Ágata de Queiroz Freitas ; orientadora, Fernanda Steffens, 2025.

85 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Malha spacer. 3. Piezoresistividade. 4. Polimerização oxidativa via in situ. I. Steffens, Fernanda. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Têxtil. III. Título.

Ágata de Queiroz Freitas

**Investigação da durabilidade e desempenho condutor de malhas têxteis
revestidas com polipirrol sob simulação de uso**

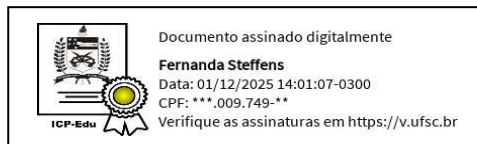
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de engenheira têxtil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Têxtil.

Local Blumenau, 19 de novembro de 2025.

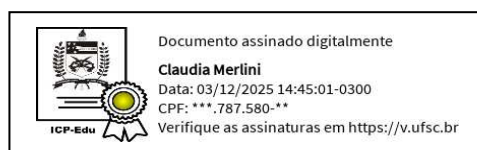


Prof.(a) Maria Elisa Phillippsen Missner, Dr.(a)
Coordenador(a) do curso

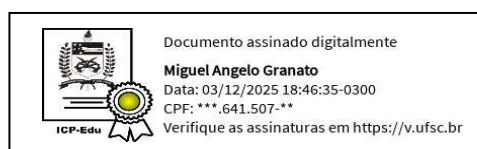
Banca examinadora



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



Prof.(a) Claudia Merlini, Dr.(a)
Instituição UFSC Blumenau



Prof.(a) Miguel Granato, Dr.(a)
Instituição UFSC Blumenau

Blumenau, 2025

Dedico este trabalho a toda minha família, por todo amor e carinho, e aos meus professores, por todo o aprendizado ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao longo desta caminhada, muitas pessoas contribuíram para que este momento fosse possível.

Agradeço à UFSC e aos professores, pelo aprendizado, pelas oportunidades, pelas discussões e pelo excelente ensino.

À minha amada família, aos meus pais, André e Rosane; minhas irmãs, Iasmim, Janine e Natasha; e minhas avós, Letícia e Zenaide por todo o apoio, suporte, conselhos e amor oferecidos durante esta trajetória.

Ao meu noivo, Marcos Gabriel, pelo companheirismo, carinho, paciência e por estar sempre ao meu lado.

Um agradecimento especial à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Fernanda Steffens, pela confiança, paciência, carinho e valiosas orientações durante o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial também a Larissa, minha amiga e mestrande em engenharia têxtil na UFSC, por todas as orientações, paciência e ajudas ao decorrer do tempo.

Agradeço também aos meus sogros, Maria Elenilza e Marcos Paulo, e à minha cunhada, Maria Gabrielle, pelo apoio, carinho e incentivo ao longo desta trajetória.

Por fim, a todos os meus amigos e colegas que estiveram comigo durante esta caminhada, deixo minha sincera gratidão, nada disso seria possível sem a participação de cada um.

“Sempre parece impossível até que seja feito.”

(Nelson Mandela, 1996)

RESUMO

O avanço dos têxteis eletrônicos tem impulsionado a busca por materiais capazes de manter propriedades elétricas mesmo após desgaste real de uso. Com essa motivação, este trabalho avaliou a durabilidade de uma malha *spacer* revestida com polipirrol (PPy), submetida a ensaios de abrasão, lavagem, suor ácido e alcalino, formação de *pilling* e a um ensaio simultâneo que integrou todos os mecanismos de degradação. O revestimento, obtido por polimerização *in situ*, apresentou deposição homogênea confirmada por FTIR e MEV. A amostra de referência exibiu condutividade inicial média de $7,11 \text{ S.m}^{-1}$, e todos os ensaios causaram degradação em diferentes intensidades. A abrasão reduziu a condutividade para aproximadamente 2 S.m^{-1} , associada ao desgaste superficial e remoção parcial do PPy. A lavagem, que combinou temperatura, detergente e agitação mecânica, provocou o maior impacto entre os testes isolados, reduzindo a condutividade para valores inferiores a 1 S.m^{-1} . Nos ensaios químicos, o suor ácido preservou grande parte da função elétrica ($\sim 5 \text{ S.m}^{-1}$), enquanto o suor alcalino causou maior instabilidade, resultando em cerca de $0,7 \text{ S.m}^{-1}$. O ensaio de *pilling* mostrou degradação acentuada da camada condutora, porém mantendo condutividade entre 1 e 2 S.m^{-1} . No ensaio simultâneo, que representa o cenário mais agressivo e realista, a condutividade foi reduzida para $0,21 \text{ S.m}^{-1}$, evidenciando desgaste cumulativo, mas ainda mantendo o material dentro da faixa condutora. A análise colorimétrica indicou maior variação de cor (ΔE) para abrasão e *pilling*, enquanto os ensaios de suor apresentaram alterações mínimas, compatíveis com a manutenção da integridade do PPy. No ensaio eletromecânico, observou-se aumento da sensibilidade piezoresistiva nas amostras degradadas e resposta elétrica mais estável na amostra de referência. Os resultados demonstram que a malha mantém funcionalidade mesmo sob múltiplos mecanismos de degradação, confirmando a eficácia da polimerização *in situ* e o potencial do material para aplicações em têxteis inteligentes e sensores flexíveis.

Palavras-chave: *Spacer*; piezoresistividade; polimerização oxidativa via *in situ*.

ABSTRACT

The growth of electronic textiles has increased the demand for materials with stable electrical performance under real-use degradation. Motivated by this need, this study evaluated the durability of a spacer knitted fabric coated with polypyrrole (PPy), subjected to abrasion, washing, acidic and alkaline sweat, pilling formation, and a combined multi-stress test. The *in-situ* polymerization method produced homogeneous coating, confirmed by FTIR and SEM analyses. The reference sample exhibited an initial conductivity of 7.11 S.m^{-1} . Abrasion reduced conductivity to approximately 2 S.m^{-1} , attributed to mechanical wear and partial removal of the conductive layer. Washing had the most severe impact among isolated tests, reducing conductivity to below 1 S.m^{-1} due to the combined effect of detergent, temperature, and mechanical agitation. Chemical tests showed distinct behaviors: acidic sweat preserved most of the electrical performance ($\sim 5 \text{ S.m}^{-1}$), whereas alkaline sweat caused more pronounced degradation, with conductivity dropping to around 0.7 S.m^{-1} . The pilling test produced significant surface damage, resulting in conductivity between 1 and 2 S.m^{-1} . The simultaneous test, representing the closest scenario to real-use degradation, led to cumulative damage and a final conductivity of 0.21 S.m^{-1} , yet still within the conductive range. Colorimetric analysis showed higher ΔE values for abrasion and pilling, while sweat-induced changes were minimal, consistent with the chemical stability of PPy. Electromechanical testing revealed increased piezoresistive sensitivity in aged samples and a more stable electrical response in the reference fabric. These results confirm that the coated spacer fabric maintains electrical functionality even under combined degradation mechanisms, demonstrating the effectiveness of *in situ* polymerization and its potential for smart textile and flexible sensing applications.

Keywords: Spacer; piezoresistivity; oxidative *in situ* polymerization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de malha <i>spacer</i> por trama	21
Figura 2 – Classificação de têxteis inteligentes	22
Figura 3 – Condutividade dos materiais segundo Xie et al. (2024)	26
Figura 4 – Piezoresistivo versus piezoelétrico	28
Figura 5 – Estrutura química da unidade de repetição do polipirrol	31
Figura 6 – Metodologia experimental	36
Figura 7 – Metodologia da polimerização	38
Figura 8 – Equipamento para ensaio de condutividade	42
Figura 9 – Malha <i>spacer</i> sem (a) e com revestimento (b)	45
Figura 10 – FTIR da malha <i>spacer</i> antes e após revestimento	46
Figura 11 – Amostras: não revestida(a) e revestida (b) após 5000 ciclos do ensaio de abrasão	48
Figura 12 – Condutividade elétrica das amostras revestidas antes e após 5000 ciclos de abrasão.	49
Figura 13 – Amostra revestida com PPy após 15 ciclos de lavagem	50
Figura 14 – Condutividade elétrica das amostras antes e depois da polimerização, após 15 ciclos de lavagem	51
Figura 15 – Amostra apenas revestida (a) revestida após ensaio ao suor: ácido (b) e alcalino (c)	53
Figura 16 – Condutividade elétrica das amostras antes e depois da polimerização, após exposição à suor ácido	53
Figura 17 – Amostra revestida após ensaio de formação de <i>pilling</i> por intermédio do equipamento Pilling box	55
Figura 18 – Condutividade elétrica das amostras antes e depois da polimerização, após exposição ao ensaio de <i>pilling</i>	56
Figura 19 – Amostras após: lavagem e <i>pilling</i> (a), lavagem, <i>pilling</i> e suor ácido (b), lavagem, <i>pilling</i> , suor ácido e abrasão (c)	57
Figura 20 – Condutividade elétrica das amostras polimerizadas, antes e após integração dos ensaios.	58
Figura 21 – Malha <i>spacer</i> revestida com PPy: resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % e tensão de compressão em 200kPa em função do tempo de ensaio 5 kPa/s: (a) amostra revestida; (b) amostra ensaiada.	60

Figura 22 – Malha <i>spacer</i> revestida com PPy: resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % e tensão de compressão em 200kPa em função do tempo de ensaio 10kPa/s: (a) amostra revestida; (b) amostra ensaiada..	61
Figura 23 – Malha <i>spacer</i> revestida com PPy: resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % e tensão de compressão em 300KPa em função do tempo de ensaio: (a) amostra revestida; (b) amostra ensaiada..	62
Figura 24 – Malha <i>spacer</i> revestida com PPy: resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % e tensão de compressão em 400KPa em função do tempo de ensaio: (a) amostra revestida; (b) amostra ensaiada..	63
Figura 25 – Micrografias das amostras: sem polimerização(a); PPy em excesso(b); após 5000 ciclos de abrasão(c); após 15 ciclos de lavagem(d)..	65
Figura 26 –Micrografias das amostras: após ensaio de resistência ao suor ácido(e), após ensaio de resistência ao suor alcalino(f); ensaio formação de <i>pilling</i> (g) e após a integração de todos os ensaios(h)	66
Figura 27 – Análise visual do ΔE , comparando a amostra referência (a), com as demais amostras testadas: após 5000 ciclos de abrasão (b); após 15 ciclos de lavagem (c); submetida ao suor ácido (d); submetida ao suor alcalino (e); após ensaio no Pilling Box (f), integração de todos os testes (g).	68
Figura 28 – Boxplot da condutividade elétrica por grupos de ensaio.	73
Figura 29 – Condutividade elétrica com desvio padrão das amostras	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Análise de artigos	33
-------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média da perda de massa das amostras antes (a) e após (b) o ensaio de resistência à abrasão.....	47
Tabela 2 – Média da perda de massa das amostras após 15 ciclos de lavagem.....	50
Tabela 3 – Média da perda de massa das amostras após os ensaios de resistência ao suor: ácido (a), alcalino(b).	52
Tabela 4 – Média da perda de massa das amostras após os ensaios de formação de <i>pilling</i>	54
Tabela 5 – Análise das coordenadas colorimétricas	68
Tabela 6 – Variação colorimétrica ΔE^*_{ab} e equivalência ISO 105-A02	70
Tabela 7 – Análise descritiva da condutividade elétrica das amostras: padrão(a); abrasão(b); lavagem(c); suor ácido(d); suor alcalino(e); <i>pilling</i> (f), todos os ensaios(g).....	72
Tabela 8 – Resultado da ANOVA para condutividade elétrica.	73
Tabela 9 – Resultados do teste post hoc de Tukey HSD	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATR	<i>Attenuated Total Reflectance</i>
CIE L*a*b*	Sistema de coordenadas colorimétricas
CNTs	<i>Carbon nanotubes</i>
<i>e-textiles</i>	<i>Electronic textiles</i>
FeCl ₃ ·6H ₂ O	Cloreto férrico hexahidratado
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de <i>Fourier</i>
LABENE	Laboratório de Beneficiamento
LABMAM	Laboratório de Meio Ambiente
LABTEC	Laboratório de Tecidos e Malhas
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
LDPT	Laboratório de Desenvolvimento de Produtos Têxteis
LTE	Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia
LTMA	Laboratório de Transformações e Materiais Avançados
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PEDOT: PSS	Poli(3,4-etilenodioxitiofeno): poli (estireno sulfonato)
PDA	Polidopamina ou camada funcional
POLICOM	Laboratório de Polímeros e Compósitos
PPy	Polipirrol
Py	Pirrol
TPU	Poliuretano termoplástico
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Condutividade elétrica
$S \cdot m^{-1}$	Siemens por metro
L	Comprimento
R	Resistência elétrica
A	Área da seção transversal
Ω	Ohm
ρ	Resistividade elétrica
$\Omega \cdot m$	Ohm.metro
$g \cdot mol^{-1}$	Gramas.mol
$S \cdot mol^{-1}$	Mol.litro
$FeCl_3:Py$	Razão molar indicada
I	Corrente elétrica
V	Tensão elétrica
E	Espessura
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	Cloreto férrico hexahidratado
cm	Centímetros
m^2	Metro quadrado
m	Metro
g	Gramas
$g \cdot L^{-1}$	Gramas.litro
%	Porcentagem / percentual
°C	Graus Celsius
KPa	Quilo Pascal
$kPa \cdot s^{-1}$	Quilo Pascal.segundo
$\Delta R \cdot R_0^{-1}$	Varição relativa de resistência elétrica
$S \cdot m^{-1}$	Siemens.metro
Kv	Quilovolt
μm	Micrômetro
mm	Milímetro
Δ	Delta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.1	OBJETIVO	18
1.1.1	Objetivos gerais	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	20
2.1	MALHA <i>SPACER</i>	20
2.2	TÊXTEIS TÉCNICOS.....	21
2.2.1	Têxteis inteligentes	21
2.2.1.1	<i>Têxteis eletrônicos</i>	23
2.3	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM MATERIAIS TÊXTEIS	23
2.3.1	Propriedade elétrica	25
2.3.2	Métodos de incorporação de propriedades condutoras em substratos têxteis	28
2.3.1.1	<i>Polímeros intrinsecamente condutores</i>	29
2.3.1.2	<i>Vantagens da polimerização in situ</i>	30
2.3.1.3	<i>Polipirrol</i>	31
3	METODOLOGIA	36
3.1	MATERIAIS.....	36
3.2	MÉTODOS	37
3.2.1	Obtenção da malha <i>spacer</i> revestida com polipirrol	37
3.2.2	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier	38
3.2.3	Microscopia eletrônica de varredura	39
3.2.4	Coordenadas colorimétricas	39
3.2.5	Avaliação da mudança de cor	39
3.2.6	Ensaio de resistência à abrasão pelo método Martindale	40
3.2.7	Ensaio solidez à lavagem	40
3.2.8	Ensaio solidez ao suor	41
3.2.9	Ensaio de formação de <i>pilling</i> por intermédio do equipamento Pilling Box	41
3.2.10	Condutividade elétrica pelo método de 4 pontas	41
3.2.11	Ensaio eletromecânico	42
3.2.12	Ensaio geral	43

3.2.13	Análise estatística dos dados	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES...ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	45
4.1	REVESTIMENTO DAS AMOSTRAS DE MALHA <i>SPACER</i> COM POLIPIRROL.....	45
4.2	ANÁLISE DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMATA DE FOURIER.....	45
4.3	INFLUÊNCIA DA ABRASÃO SOBRE A CONDUTIVIDADE DAS AMOSTRAS	47
4.4	VERIFICAÇÃO DA CONDUTIVIDADE APÓS CICLOS DE LAVAGEM.....	49
4.5	ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO SUOR SOBRE AS AMOSTRAS REVESTIDAS.....	52
4.6	ANÁLISE DE ENSAIO DE FORMAÇÃO DE <i>PILLING</i> SOBRE AMOSTRAS REVESTIDAS.....	54
4.7	DISCUSSÃO INTEGRADA DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	57
4.8	ENSAIO ELETROMECAÂNICO DAS AMOSTRAS REVESTIDAS	59
4.9	ANÁLISE VISUAL E COMPARATIVA.....	63
4.9.1	Análise de microscopia eletrônica de varredura.....	64
4.9.2	Análise de coordenadas colorimétricas	67
4.9.2	Avaliação da mudança de cor.....	70
4.10	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	71
5	CONCLUSÃO	76
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

A presença cada vez maior de tecnologias no cotidiano vem transformando a forma em que se vive e percebe o mundo, com isso a conectividade está mais presentes no dia a dia, se tornando algo essencial para a vida do ser humano. Aliado a isso, com a crescente demanda por novas tecnologias, o mercado de desenvolvimento de novos produtos têxteis tem encontrado maiores e cada vez mais complexas demandas para solucionar (ZHANG, *et al.* 2025).

Dessa forma, os têxteis inteligentes vêm ganhando maior notoriedade, por se diferenciarem dos têxteis classificados como convencionais, apresentando aptidão para alterarem suas propriedades a partir de estímulos externos. A partir desses materiais, uma vasta área de estudos está em desenvolvimento, apresentando diferentes ramos de pesquisas, como na saúde, segurança, transportes, arquitetura e construção civil (MAESTRI *et al.* 2022).

Os *e-textiles* (abreviação do termo em inglês *electronic textiles*, que traduzindo para o português significa têxteis eletrônicos), são têxteis inteligentes que apresentam em sua constituição componentes eletrônicos. Esses materiais vêm desenvolvendo soluções inovadoras, podendo ser usados tanto para moda, quanto para aplicações técnicas, por apresentarem funções como sensoriamento e transmissões de dados (ALVES, *et al.* 2025). Os *e-textiles*, nas últimas décadas vêm se consolidando em um campo de desenvolvimento que reúne saberes da engenharia têxtil, eletrônica e da tecnologia da informação (SKYRME, 2023).

A condutividade elétrica é um pré-requisito essencial para o desenvolvimento de *e-textiles*, pois possibilita a integração e o funcionamento de componentes ativos, como sensores, atuadores e sistemas de iluminação no substrato têxtil. Diversas abordagens são descritas na literatura para conferir essa propriedade a materiais têxteis, incluindo o pós-tratamento por revestimento superficial (*dip-coating* ou *coating*) com polímeros condutores, materiais à base de carbono, metais ou suas combinações, bem como a adição de cargas condutoras durante a fiação, o que permite a produção de fibras ou fios condutores. Segundo Ojstršek, Jug e Plohl (2022), essas técnicas têm sido amplamente aplicadas no desenvolvimento de têxteis inteligentes e eletrônicos, permitindo incorporar condutividade sem comprometer significativamente a flexibilidade e o conforto típicos dos substratos têxteis, além de possibilitar variações conforme o tipo de material e a aplicação desejada.

Comparado com outros métodos de preparação, como por exemplo a incorporação de monofilamentos metálicos, *e-textiles* flexíveis feitos por processos de revestimento polimérico mostraram um melhor desempenho em termos de condutividade elétrica, propriedades mecânicas e vida útil. Dentre os diferentes tipos de polímeros condutores, o polipirrol (PPy) é constituído por meros e é encontrado em forma de líquido incolor e oleoso à temperatura ambiente, com um elevado ponto de ebulição e baixa densidade, apresentando vantagens relacionadas a simplicidade de sua síntese, elevada condutividade elétrica, baixo custo e boa estabilidade ambiental (ZHANG, *et al.* 2025). O PPy consiste em um polímero condutor com estrutura conjugada positiva equilibrada por contra-íons. A depender da dopagem, dos contra-íons e dos oxidantes usados apresenta molhabilidade que varia da hidrofobicidade à hidrofobicidade. Além disso, é facilmente preparado e pode ser incorporado a substratos têxteis via polimerização oxidativa *in situ* (ZHANG *et al.* 2023).

Tratando de estruturas têxteis, materiais provenientes da tecnologia de malharia por trama podem ser usados em diversos segmentos técnicos, assim como na produção de têxteis inteligentes (MAESTRI, 2022). A partir da tecnologia por trama é possível desenvolver estruturas do tipo *spacer*, que são constituídas por duas camadas de tecido, unidas por fios de ligação. Devida sua constituição, essas estruturas apresentam propriedades como elasticidade, resistência à compressão, resistência ao impacto, elevada resiliência além de proporcionar boa respirabilidade e permeabilidade à umidade (LIN, *et al.* 2023). Essas propriedades tornam a malha *spacer* uma base ideal para integração com materiais funcionalizados, como polímeros condutores.

A piezoresistividade, característica observada em materiais semicondutores e condutores, está relacionada tanto à variação das distâncias entre os portadores de carga elétrica quanto à reorganização dos caminhos percolantes que ocorre quando esses materiais são submetidos a deformações mecânicas. (BARLIAN *et al.* 2009). Os tecidos revestidos com PPy manifestam-se pela variação da resistência elétrica sob deformação mecânica, resultado da reorganização dos caminhos condutores durante o estiramento e/ou contração da malha, possibilitando sua aplicação como sensor flexível. A malha *spacer* apresenta uma boa vantagem na utilização para substituição de materiais como Neoprene, devida a sua elevada resiliência (YU, *et al.* 2022), o que torna uma excelente escolha para fabricação de materiais piezoresistivos.

Diante do exposto, a avaliação do comportamento da malha *spacer* revestida com PPy em diferentes situações de uso real por meio de ensaios de lavagem, suor, *pilling* e abrasão, mostrando-se essencial para compreender sua aplicabilidade em produtos com distintas finalidades, principalmente quando em contato com o corpo humano. Fazendo uma busca aprofundada na literatura, foram encontradas sete referências de estudo utilizando malhas *spacer* revestidas com polipirrol presentes no Quadro 1. Tal investigação se torna ainda mais relevante diante da escassez de estudos na literatura sobre o tema, o que reforça a necessidade de ampliar o conhecimento científico e oferecer subsídios para o desenvolvimento de novas soluções e aplicações tecnológicas.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Verificar a solidez do revestimento de polipirrol aplicado em uma malha *spacer*, simulando condições reais de uso, com o propósito de avaliar a condutividade elétrica e o comportamento piezoresistivo do material, bem como analisar estatisticamente a influência dos diferentes ensaios sobre o desempenho elétrico obtido.

1.1.2 Objetivo específico

- a) Investigar a influência do processo de polimerização *in situ* na uniformidade do revestimento e na funcionalização das malhas *spacer* com polipirrol;
- b) Correlacionar as propriedades físicas e elétricas das malhas revestidas, verificando sua viabilidade como material têxtil eletrônico para aplicação em sensores ou compósitos inteligentes;
- c) Avaliar a estabilidade da condutividade elétrica das amostras submetidas a diferentes condições de uso: lavagem, suor, abrasão e *pilling*, de forma isolada e combinada;
- d) Examinar a relação entre a resistência à abrasão e os danos superficiais com o desempenho elétrico das amostras, identificando possível redução da condutividade.

- e) Realizar a análise estatística dos dados obtidos, verificando a significância das variações de condutividade elétrica entre os diferentes ensaios.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão apresentados os conceitos da fundamentação teórica utilizados para obter a compreensão do tema abordado neste estudo. Inicia-se com uma apresentação sobre malha *spacer* por trama, seguindo para têxteis técnicos, onde será discutido têxteis inteligentes e *e-textiles*. Por fim, será discutido sobre a condutividade elétrica dos materiais têxteis, métodos de obtenção, efeito piezoresistivo, verificando na literatura estudos já realizados.

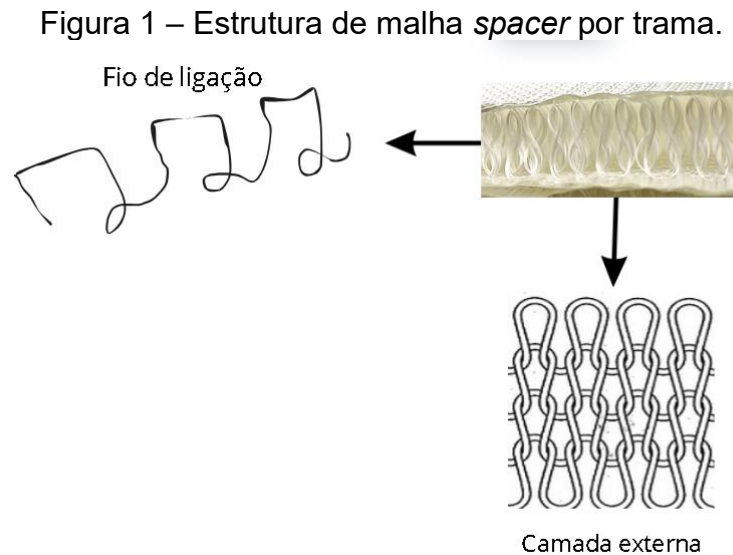
2.1 MALHA SPACER

A estrutura *spacer* consiste em um têxtil tridimensional, que apresenta duas camadas (superior e inferior), interligadas por fios de ligação dispostos perpendicularmente às camadas, sendo geralmente monofilamentos. Sua obtenção pode ser dada tanto pelo processo de tecnologia de malharia, quanto por tecelagem, onde os métodos obtidos pela primeira tecnologia são mais comumente utilizados. De acordo com He *et al.* (2024), a estrutura das malhas *spacer* é determinada pelas propriedades mecânicas dos monofilamentos utilizados como fios de ligação, influenciando diretamente o desempenho da malha em termos de resistência à compressão e resiliência.

Uma das maiores vantagens da estrutura *spacer* é a sua utilização como substituição de espumas empregadas em tecidos para a criação de volume, suavidade, resiliência e flexibilidade (HORROCKS *et al.* 2016). Dentro do segmento de malharia, malhas *spacer* podem ser obtidas tanto pela tecnologia de malharia por trama como por urdume. Na malharia por urdume são desenvolvidos em teares Raschel de duas barras de agulhas, enquanto os tecidos *spacer* de trama podem ser manufaturados em teares retilíneos ou circulares, ambos configuradas em teares duplafronturas (DEJENE, 2024).

A malha *spacer* apresenta aplicações diversificadas, incluindo funções como isolante térmico, materiais para absorção acústica, além de aplicações em têxteis inteligentes, compósitos estruturais avançados, e em sensores vestíveis (WANG; ZHANG; LI, 2024). Além disso, essas malhas podem atuar como materiais de amortecimento sem comprometer o conforto, constituindo alternativas às espumas poliméricas no desenvolvimento de interiores automotivos, almofadas, colchões,

protetores de impacto e produtos semelhantes (LOTZ *et al.* 2019). Uma das diferenças entre a malha por urdume e por trama do tipo *spacer* está na camada externa, que é mais estável na malha por urdume, enquanto a malha por trama apresenta maior conforto (DEJENE, 2024). Na Figura 1, é possível observar um exemplo de estrutura *spacer* por trama.



Fonte: elaborada pela autora

2.2 TÊXTEIS TÉCNICOS

Segundo Maity (2023), têxteis técnicos são tecidos projetados para aplicações de elevado desempenho. Esses tecidos servem a propósitos especiais, com funções como resistência ao fogo, proteção contra radiação, controle de temperatura, monitoramento de saúde, resistência mecânica, entre outros. Com o objetivo de apresentar características que atendem rigorosos padrões de qualidade, superando os têxteis convencionais (ALDALBAHI, *et al.* 2021; MARQUES, 2018).

2.2.1 Têxteis inteligentes

O conceito de têxteis inteligentes, também conhecidos como materiais inteligentes, foi disseminado pela primeira vez no Japão em 1989, sendo introduzido de forma mais ampla na indústria têxtil apenas no final da década de 1990 (FERREIRA, *et al.* 2014).

Os têxteis inteligentes constituem materiais que unem tecnologia e funcionalidade, sendo capazes de responder a estímulos externos para interagir e adaptar a esses ambientes (MAESTRI, *et al.* 2023b). Esses materiais, podem ser classificados em três grupos, sendo eles: passivo, ativo e muito inteligentes. Os passivos possuem características funcionais sem a interação com o ambiente, tendo sua propriedade inteligente intrinsecamente ao material têxtil, sem a necessidade de ações externas. Já os materiais ativos são capazes de sentir e responder a estímulos externos, atuando como sensores e atuadores. Já a terceira categoria, os muito inteligentes, contempla os têxteis que são capazes de perceber mudanças no ambiente externo, reagir a elas e se adaptar às condições necessárias (MAESTRI, 2022). É possível observar na Figura 2 a ilustração da classificação apresentada.

Figura 2 – Classificação de têxteis inteligentes.



Fonte: adaptado de Sájovic *et al.* (2023).

2.2.1.1 Têxteis eletrônicos

Dentro do segmento de têxteis inteligentes, destacam-se os *e-textiles*, que surgiram por volta de 1990 e englobam diversas aplicações, como uniformes equipados com fibras ópticas integradas para o monitoramento de soldados, têxteis com eletrodos destinados ao acompanhamento de atividades cardiopulmonares e tecidos termo e piezoresistivos empregados na medição de variações térmicas e parâmetros biomecânicos (FERREIRA *et al.* 2014).

Os e-têxteis representam uma evolução importante na integração de funcionalidades eletrônicas diretamente aos substratos têxteis, utilizando o vestuário como plataforma para detecção, atuação, exibição, comunicação, coleta e armazenamento de energia, além de computação. Diferentemente dos primeiros e-têxteis, que dependiam da fixação de componentes eletrônicos convencionais sobre o vestuário, avanços recentes em ciência dos materiais e eletrônica têm permitido que os e-têxteis modernos realizem múltiplas funções eletrônicas de forma flexível e respirável, mantendo conforto e adaptabilidade ao usuário (DU *et al.* 2022).

2.3 MATERIAIS TÊXTEIS CONDUTORES

A condutividade elétrica está diretamente relacionada à capacidade das cargas elétricas se deslocarem de um ponto a outro em determinados materiais quando estes são submetidos a uma tensão elétrica. Essa característica é altamente explorada para a ciência e tecnologia, agindo como fator fundamental para o desenvolvimento de novos dispositivos e sistemas elétricos (FREITAS *et al.* 2024).

Materiais têxteis convencionais são isolantes elétricos e, portanto, não podem ser utilizados diretamente em aplicações em que exigem condutividade elétrica. Para torná-lo eletricamente condutor, é necessário integrar fios metálicos, como prata, aço inoxidável, níquel, alumínio e cobre; polímeros condutores ou outros compostos condutores na estrutura têxtil, podendo essa integração ocorrer em diferentes etapas do processo, como na manufatura das fibras, na fiação dos fios, durante a formação do tecido, entre outros. Tais desenvolvimento permitem que o tecido seja aplicado em sensores vestíveis, sistemas de comunicação ou outros dispositivos eletrônicos integrados (MAITI *et al.* 2020)

O termo “têxteis eletricamente condutores”, é utilizado para vários tipos de produtos com base têxtil que apresentam uma determinada condutividade elétrica, podendo ser fios, fibras, tecidos e produtos manufaturados por meio deles. A qualidade desse material, ou seja, a permanência do agente condutor no substrato fibroso, define sua durabilidade, que está relacionado a resistência à lavagem, a possibilidade de reutilização e ao desempenho do produto propriamente dito (GRANCARIĆ, *et al.* 2017).

Esses materiais servem como pré-requisitos necessários para o desenvolvimento de têxteis inteligentes cujas aplicações precisam de respostas elétricas. As características desses materiais são fundamentais para garantir a funcionalidade e eficácia dos têxteis inteligentes. Consequentemente, é essencial compreender e aprimorá-las para promover o avanço de têxteis inteligentes mais sofisticados e duráveis (GRANCARIĆ, *et al.* 2018).

As fibras condutoras podem ser classificadas de acordo com sua natureza condutiva ou processo de fabricação, podendo ser: fibras metálicas (alta condutividade), fibras poliméricas condutoras, fibras revestidas com materiais condutores e fibras a base de carbono, onde cada categoria apresenta propriedades específicas, como conforto, resistência mecânica e condutividade elétrica (IDUMAH, 2023).

Existem diferentes métodos para a produção de têxteis eletricamente condutores, incluindo a incorporação de monofilamentos metálicos ao fio, o revestimento de fibras sintéticas com camadas condutoras sobre a aplicação de pigmentos condutores na superfície do tecido e processos de polimerização (PARADISO *et al.* 2014), cada uma permitindo ajustar propriedades elétricas e mecânicas conforme a aplicação desejada. Contudo, apesar dos avanços, a durabilidade e a resistência desses têxteis ainda representam desafios importantes, especialmente para aplicações em dispositivos vestíveis e outros produtos inteligentes (LIU *et al.* 2025).

A técnica mais empregada na fabricação de têxteis eletrônicos é o revestimento, que consiste na aplicação de uma camada condutora sobre o substrato fibroso, caracterizando-se por sua simplicidade e baixo custo. A técnica de impressão, por sua vez, possibilita a deposição do material condutor diretamente sobre o substrato, oferecendo maior versatilidade em termos de *design* e padrões, além de permitir produção em larga escala. No entanto, ambas tecnologias podem apresentar

limitações relacionadas à durabilidade: o revestimento tende a apresentar baixa resistência à abrasão em aplicações de elevado impacto ou uso intensivo, enquanto a impressão pode resultar em menor solidez à lavagem (TSEGHAI, *et al.* 2020).

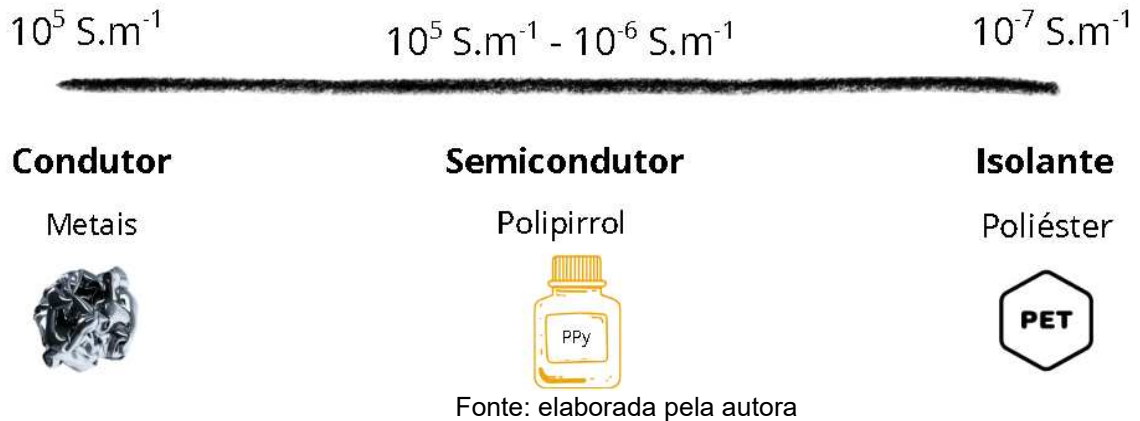
2.3.1 Propriedades elétricas

As propriedades elétricas desempenham um papel fundamental nos materiais para diversas aplicações. Há dois principais grupos de materiais os quais se destacam nas propriedades elétricas: metais e polímeros intrinsecamente condutores (PICs). Os metais são reconhecidos por sua elevada condutividade elétrica, atribuída à presença de elétrons livres que se deslocam com facilidade sob a ação de um campo elétrico aplicado. Em contrapartida, os PICs, são materiais poliméricos que apresentam características elétricas e óticas semelhantes às de semicondutores e metais inorgânicos. Esses materiais têm despertado grande interesse devido à sua importância econômica, excelente estabilidade ambiental, condutividade elétrica, óticas e eletrônicas adequadas (DU *et al.* 2025).

As malhas, em sua forma original, não apresentam comportamento condutor de eletricidade, o mesmo ocorre com as malhas *spacer* por trama. Isso se deve ao fato de serem constituídas, em grande parte, por polímeros isolantes, como poliéster e poliamida. Diante dessa limitação, torna-se necessário recorrer a estratégias de funcionalização, como a deposição de polímeros condutores ou a aplicação de tratamentos químicos específicos para conferir condutividade elétrica.

A condutividade elétrica (σ) é uma propriedade física importante a qual descreve a capacidade de um material em permitir o fluxo de corrente elétrica. Ela pode classificar os materiais a partir de sua condutividade conforme a Figura 3, como: condutores, aqueles que apresentam condutividade superior a 10^5S.m^{-1} ; semicondutores, possuindo condutividade entre 10^{-6}S.m^{-1} e 10^5S.m^{-1} ; e isolantes, com condutividade menor que 10^{-7}S.m^{-1} (XIE *et al.*, 2024). Matematicamente, a condutividade de um material pode ser expressa pela Equação 1 (HALLIDAY, *et al.* 2012). Nos polímeros totalmente dopados, a condutividade tende a diminuir com a redução da temperatura, comportamento oposto ao observado nos metais convencionais, cuja condutividade aumenta à medida que a temperatura diminui (LE, *et al.* 2017).

Figura 3 – Condutividade dos materiais segundo Xie et al. (2024).



$$\sigma = \frac{L}{R \cdot A} \quad (1)$$

Onde:

σ = condutividade elétrica em S.m^{-1} ;

L = comprimento em m;

R = resistência elétrica em Ω ;

A = área da secção transversal em m^2 .

A resistência elétrica (R) tem a função de limitar o fluxo de corrente elétrica, enquanto a resistividade elétrica (ρ) define o grau desse impedimento. Dessa forma, a resistividade corresponde à medida da oposição que um material oferece à passagem de corrente elétrica em seu interior, sendo influenciada pela geometria comprimento (L) e área da seção transversal (A) e pela própria natureza do material (HALLIDAY *et al.* 2012).

A resistividade elétrica (ρ) de um material é influenciada por diversos fatores, incluindo suas propriedades intrínsecas, composição química, estrutura cristalina e temperatura. Em materiais condutores, como os metais, a resistividade tende a aumentar com o acréscimo da temperatura, em razão da intensificação das vibrações atômicas na rede cristalina, o que dificulta o movimento dos elétrons livres (AMORIM, 2014).

Matematicamente, a resistência elétrica (R) de um material é expressa pela Equação 2.

$$R = \frac{\rho * L}{A} \quad (2)$$

Onde:

R = resistência elétrica em Ω ;

ρ = resistividade elétrica em $\Omega.m$;

L = comprimento em m;

A = área da seção transversal em m^2 .

Outros conceitos relevantes são a piezoresistividade e a piezoeletricidade. A piezoresistividade é um fenômeno eletromecânico no qual a resistividade elétrica de um material se altera em função de sua deformação mecânica, resultando na variação do potencial elétrico quando uma tensão é aplicada. Já a piezoeletricidade ocorre em materiais capazes de gerar cargas elétricas quando submetidos a deformações mecânicas, respondendo a estímulos como vibrações, ondas ultrassônicas, pressão ou movimento corporal. A magnitude da resposta piezoresistiva ou piezoelétrica está relacionada à intensidade da variação de resistividade elétrica ou de tensão/carga elétrica gerada durante a deformação do material. Essa magnitude depende da orientação da deformação em relação à estrutura do material, de suas propriedades intrínsecas, como sensibilidade piezoresistiva ou constante piezoelétrica, e de características físicas, como leveza e flexibilidade, além da polarização prévia, no caso dos materiais piezoelétricos (MAESTRI, 2023). Materiais com maior sensibilidade, alinhamento adequado e polarização eficiente apresentam respostas significativamente superior, sendo, portanto, mais adequados para sensores e dispositivos vestíveis de alta precisão. A Figura 4 ilustra a diferença entre esses dois efeitos.

Figura 4 – Piezoresistivo *versus* piezoelétrico.

Fonte: elaborada pela autora

2.3.2 Métodos de incorporação de propriedades condutoras em substratos têxteis

A incorporação de materiais condutores de eletricidade em materiais têxteis pode ser alcançada por diferentes métodos de polimerização e deposição, cada um com vantagens e limitações específicas. Um dos procedimentos mais utilizados é o revestimento por imersão (*dip-coating*), no qual o substrato têxtil é imerso em uma solução contendo o polímero condutor ou precursores condutores, formando uma camada contínua do material. Essa técnica é atrativa por sua simplicidade, baixo custo e pela possibilidade de aplicação em escala industrial (OJSTRŠEK; JUG; PLOHL, 2022).

Uma alternativa amplamente explorada é a impressão de tintas condutoras, que pode ser realizada por serigrafia, *spray* ou *inkjet*. Esse método permite maior precisão no *design* e a produção de padrões complexos, sendo especialmente promissor para aplicações em dispositivos vestíveis. No entanto, desafios relacionados à adesão e à durabilidade ainda precisam ser superados (EGHAN *et al.* 2025). Um exemplo

relevante é a formulação de tintas compósitas de grafeno e prata aplicadas por impressão *inkjet*, que resultaram em elevada condutividade elétrica em tecidos (KARIM, *et al.* 2019).

A polimerização oxidativa *in situ* também se destaca, pois o polímero condutor é sintetizado diretamente sobre as fibras, garantindo melhor adesão e integração com o substrato. Pesquisas recentes demonstram o crescimento direto de nanofios metálicos em fibras poliméricas, formando redes condutoras com elevada transparência e flexibilidade (NANOSCALE, *et al.* 2022). Já a deposição eletroquímica ou eletro polimerização consiste na formação do polímero condutor, como polipirrol ou PEDOT, diretamente sobre o substrato têxtil a partir de processos eletroquímicos. Esse método possibilita o controle da espessura e da morfologia do recobrimento, favorecendo a estabilidade elétrica dos tecidos resultantes (SERRANO-CLAUMARCHIRANT, *et al.* 2023).

Além disso, polímeros como por exemplo: Poli(3,4-etilenodioxitiofeno) e poliestireno sulfonato (PEDOT:PSS) podem ser aplicados por diferentes técnicas: tingimento, revestimento ou impressão, ampliando as possibilidades de funcionalização e aplicação dos substratos têxteis condutores (TSEGAHI *et al.* 2020). De forma abrangente, estudos recentes indicam que a escolha do método deve considerar não apenas a condutividade obtida, mas também fatores como conforto, flexibilidade, solidez e sustentabilidade dos processos. Nesse sentido, revisões sistemáticas indicam que os têxteis revestidos com materiais condutores representam uma área em expansão, com grande potencial para aplicações em eletrônicos vestíveis e dispositivos flexíveis (ZHANG; LI; WANG, 2024).

2.3.2.1 Polímeros intrinsecamente condutores

Originalmente, os polímeros orgânicos eram amplamente utilizados devido às suas propriedades isolantes. Porém, com o desenvolvimento dos polímeros intrinsecamente condutores, tornou-se possível explorar características elétricas nesses materiais, ampliando suas aplicações tecnológicas. Além disso, os PICs podem contribuir para a redução de impactos ambientais, seja pela possibilidade de substituir metais em dispositivos eletrônicos, seja pela viabilização de materiais mais leves, recicláveis ou provenientes de fontes renováveis (HASAN *et al.*, 2025).

Os polímeros condutores combinam propriedades vantajosas dos metais (condutividade elétrica) e características como a leveza (LIU *et al.* 2017). Esses polímeros podem ser classificados em extrínsecos e intrínsecos, conforme o método de obtenção. Os extrínsecos são produzidos pela adição de cargas condutoras como negro de fumo ou fibras metálicas à matriz polimérica.

Por outro lado, os polímeros condutores apresentam condutividade elétrica própria, adquirida após um processamento específico. Entre os PICs mais estudados destacam-se o politiofeno (PT), o polipirrol e a polianilina (PANI). A capacidade condutiva desses polímeros decorre da conjugação de ligações simples e duplas em sua cadeia, associada ao processo de dopagem, no qual ocorre a inserção ou remoção de elétrons das ligações duplas (C=C). Assim, a condução elétrica ocorre pelo movimento de elétrons e vacâncias ao longo da cadeia polimérica.

Devido a essas propriedades, os PICs têm sido amplamente investigados em diversas aplicações, como sensores, filmes poliméricos, revestimentos anticorrosivos, dispositivos eletroquímicos, baterias, capacitores, supercapacitores e conversores de energia solar (LIMA *et al.* 2024).

Os polímeros condutores conduzem eletricidade graças à conjugação estendida e à deslocalização dos elétrons π em sua estrutura. Esses materiais têm atraído crescente interesse por sua facilidade de processamento e pela possibilidade de ajuste da condutividade elétrica (HASAN *et al.* 2025).

2.3.2.2 *Vantagens da polimerização oxidativa in situ*

A polimerização *in situ* tem atraído considerável interesse tanto na comunidade acadêmica quanto na indústria. Esta forma de polimerização consiste na formação do polímero diretamente no substrato, resultando em forte integração entre fases e propriedades funcionais mais estáveis. O processo envolve difusão de monômeros no material, ativação da polimerização e posterior lavagem e cura, sendo influenciado por parâmetros como concentração de reagentes, temperatura, pH, tempo e características do substrato.

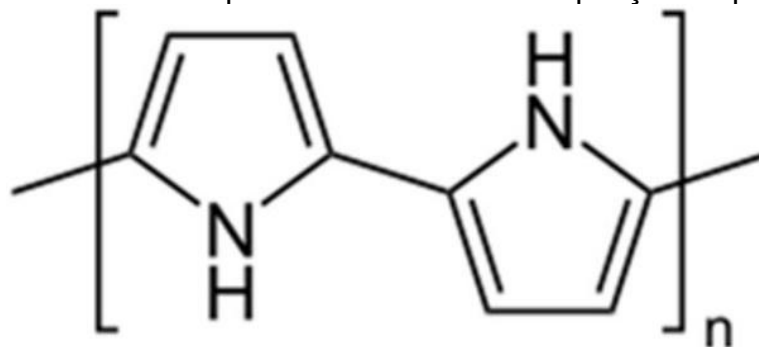
Atualmente, entre os diversos métodos de preparação de tecidos condutores utilizando polipirrol, o método de polimerização *in situ* e o método de impregnação seguido de secagem são amplamente estudados devido às vantagens do processo simples e do baixo custo. Comparando os dois métodos, o primeiro, de impregnação

e secagem, apresenta desvantagem que a ligação entre o polímero e o substrato têxtil não ser suficientemente resistente, podendo facilmente se desprender. Enquanto substratos fibrosos, preparados pelo método de polimerização oxidativa *in situ* apresentam propriedades mecânicas mais resistentes, além de geralmente apresentarem melhor resistência ao atrito e à lavagem (LUO, *et al.* 2023).

2.3.2.3 Polipirrol

O polipirrol é um dos polímeros condutores mais estudados devido à sua elevada condutividade, estabilidade química e síntese relativamente simples. Suas propriedades elétricas, redox e óticas tornam-no promissor para diversas aplicações, como dispositivos eletrocromáticos e baterias. A primeira síntese do PPy foi realizada em 1916 por A. Angeli e L. Alessandro via oxidação química do pirrol. Mas foi apenas em 1968 que foi publicado o primeiro estudo detalhando sua síntese e suas propriedades condutoras, onde foi utilizado o método eletroquímico com eletrodos de platina e solução de pirrol em ácido sulfúrico 0,1 N (LIMA *et al.* 2024). As cadeias poliméricas do PPy são formadas por unidades aromáticas ligadas por átomos de carbono, conferindo elevada condutividade elétrica e boa estabilidade oxidativa, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Estrutura química da unidade de repetição do polipirrol.



Fonte: PIRES; MORAIS; *et al.* 2018

Nos últimos anos, o polipirrol tem sido amplamente empregado em têxteis inteligentes e dispositivos eletrônicos flexíveis devido à sua excelente biocompatibilidade, estabilidade ambiental e térmica (ZHANG *et al.* 2025). A síntese do PPy pode ocorrer por via química ou eletroquímica. A síntese do polipirrol pode ser realizada por polimerização química ou eletroquímica. A polimerização química *in situ*

é amplamente empregada para revestir diretamente fibras, fios e tecidos, permitindo integração eficiente do PPy ao substrato com boa adesão, flexibilidade e possibilidade de produção em larga escala, além de apresentar menor custo e maior versatilidade de processamento. Já a polimerização eletroquímica também viabiliza a formação do PPy diretamente sobre o material condutor, conferindo maior controle estrutural e elevada condutividade elétrica, porém sua aplicação industrial é limitada pela necessidade de eletrodos e pela área disponível para deposição. Apesar de utilizarem mecanismos semelhantes de oxidação do monômero, as diferenças entre as rotas sintéticas influenciam diretamente a morfologia, a uniformidade do revestimento e o desempenho elétrico do material final (LIMA *et al.* 2024).

Os têxteis inteligentes, caracterizados por suas propriedades funcionais adicionais, podem ser aprimorados pela combinação entre substratos tridimensionais como as malhas *spacer* com polímeros condutores, como o PPy. Nesse arranjo, a malha *spacer* atua como um suporte estruturado e flexível, permitindo que o PPy seja incorporado de forma uniforme sobre as fibras, garantindo condutividade elétrica estável e durabilidade mecânica. A sinergia entre o substrato têxtil e o polímero condutor torna essa abordagem promissora para o desenvolvimento de sensores vestíveis, dispositivos piezoresistivos e outros têxteis funcionais.

A partir de uma revisão aprofundada da literatura, foram identificados sete artigos que abordam o uso de malhas *spacer* revestidas com polipirrol, utilizando como palavras-chave “*spacer fabric*” e “*polypyrrole*”. Os estudos demonstram que a utilização de substratos têxteis, como as malhas *spacer*, constituem uma estratégia eficiente para a produção de tecidos condutores por meio do revestimento com PPy. A partir dos artigos obtidos, foi elaborado o Quadro 1 que apresenta as principais informações.

Quadro 1 – Análise de artigos

(continua)

Artigo/Ano	DOI	Resumo	Método de polimerização	Ensaio realizados
Study of Electrical and Mechanical Properties of Polypyrrole-Coated Three-Dimensional Spacer Fabric/2024	10.1177 /24723444231220696	Foi investigado o revestimento da malha <i>spacer</i> com PPy, analisando condutividade elétrica, propriedades mecânicas e estabilidade a longo prazo.	Polimerização oxidativa em fase líquida	<ul style="list-style-type: none"> - Resistência elétrica - Ensaio de tração - Estabilidade elétrica ao longo do tempo - Microscopia eletrônica de varredura - Espectroscopia no infravermelho
Weft-Knitted Spacer Fabric for Highly Stretchable–Compressible Strain Sensor, Supercapacitor, and Joule Heater/2022	10.3390 /nano12203684	Desenvolvimento de sensores piezoresistivos, supercapacitores e aquecedores Joule usando malha <i>spacer</i> revestida com nanotubos de carbono e PPy. Resultados apresentaram elevada sensibilidade e estabilidade.	Polimerização <i>in situ</i> de polipirrol com nanotubos de carbono	<ul style="list-style-type: none"> - Eletromecânico - Ciclos de compressão e estiramento - Testes de - Aquecimento Joule
Development of Highly Sensitive Piezoresistive Sensors with Spacer Conductive Fabrics/2022	10.3390 /polym14050859	Desenvolvimento de sensores piezoresistivos de elevada sensibilidade usando malhas <i>spacer</i> condutoras.	Polimerização <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio piezoresistivos - Ensaio de repetibilidade e estabilidade elétrica - Ciclos de compressão e alongamento
Study on the properties of polypyrrole (PPy) coated 3D spacer conductive fabric/2019	10.1088 /1742-6596/2783/1/012019	Análise das propriedades elétricas e estabilidade de malhas <i>spacer</i> revestidas com PPy, incluindo resistência elétrica e durabilidade	Polimerização oxidativa em fase líquida	<ul style="list-style-type: none"> - Medição de resistência superficial - Estrutura química - Morfológico - Ensaio de resistência a tração e abrasão
Fabrication of a Capacitive 3D Spacer Fabric Pressure Sensor with a Dielectric Constant Change for High Sensitivity/2024	10.3390 /s24113395	Desenvolver sensor de pressão capacitivo de alta sensibilidade em uma malha <i>spacer</i> de poliéster, com nanopartículas condutoras para promover mudanças na constante dielétrica sob pressão	Revestimento físico, por adsorção e deposição superficial sobre as fibras do poliéster.	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterização morfológica da malha - Ensaio de desempenho elétrico - Ensaio de resposta piezoresistiva e histerese - Ensaio mecânico e térmico
Research on the Performance of Polypyrrole Coated Conductive Fabrics Prepared from Different Base Materials/2023	10.2478 /ftee-2023-0018	Análise da malha <i>spacer</i> com diferentes polímeros para revestimento: TPU/PPy/PDA	Polimerização <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Resistência elétrica - MEV - Solidez à lavagem

Quadro 1 – Análise de artigos

(conclusão)

Artigo/Ano	DOI	Resumo	Método de polimerização	Ensaio realizados
Multifunctional polypyrrole and rose-like silver flower-decorated knitted cotton/spandex conductive fabric for wearable devices/2022	10.1016/j.snb.2021.130019	Desenvolvimento de malha piezoresistiva de algodão/spandex revestida com PPy e decorada com flores de prata, como supercapacitor e monitoramento.	Polimerização <i>in situ</i>	- Estabilidade térmica e mecânica

Fonte: elaborado pela autora

Conforme observado nos artigos analisados, quando o objetivo é recobrir diretamente tecidos, fibras ou fios com polímeros condutores, emprega-se majoritariamente a polimerização oxidativa *in situ*. Nesse processo, a formação do polímero ocorre diretamente sobre o substrato têxtil, garantindo forte adesão, revestimento uniforme e preservação da estrutura e da flexibilidade do material. Essa polimerização *in situ* pode ser conduzida por diferentes rotas, sendo a mais utilizada a polimerização oxidativa, na qual o monômero é convertido em uma cadeia polimérica por meio da remoção de elétrons através de um agente oxidante. Dependendo da técnica empregada, essa oxidação pode ocorrer por métodos químicos, adequados para escalas maiores, ou eletroquímicos, que oferecem maior controle estrutural sobre o polímero. Assim, a escolha da abordagem influencia diretamente a morfologia do revestimento e a condutividade elétrica final do compósito têxtil.

Dentre os artigos analisados, apenas o estudo *Development of High-Sensitivity Piezoresistive Sensors Based on Highly Breathable Spacer Fabric with TPU/PPy/PDA Coating*, realizou ensaios de solidez à lavagem e o *Study on the properties of polypyrrole (PPy) coated 3D spacer conductive fabric*, realizou ensaio de resistência a abrasão com o equipamento Martindale. Os demais focaram principalmente na mensuração da condutividade elétrica, propriedades mecânicas e respostas piezoresistivas. Nenhum dos trabalhos avaliou a formação de *pilling* por intermédio do equipamento Pilling Box ensaio essencial para estimar a durabilidade do revestimento

em condições reais de uso, uma vez que o futuro sensor pode estar em contato com diferentes superfícies.

A verificação da solidez e da resistência mecânica é fundamental nesse tipo de material, uma vez que tecidos condutores são frequentemente submetidos a lavagens, fricções e deformações durante o uso, especialmente em dispositivos vestíveis, sensores e tecidos funcionais. Sem essas avaliações, não é possível assegurar a manutenção da condutividade elétrica e do desempenho mecânico ao longo do tempo.

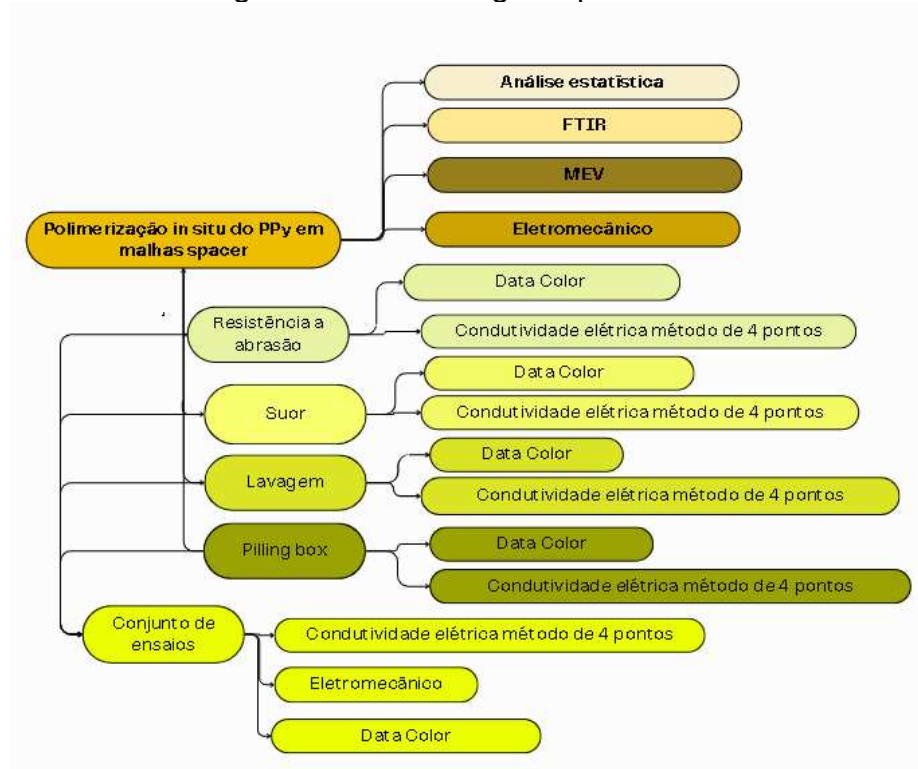
Os estudos existentes apresentam resultados satisfatórios em termos de condutividade elétrica, entretanto, há uma lacuna evidente na avaliação da durabilidade prática, envolvendo ensaios de formação de *pilling*, solidez ao suor e lavagens sucessivas fatores cruciais para a viabilidade de aplicações têxteis funcionais e vestíveis.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é verificar a solidez do polipirrol em uma malha *spacer*, simulando condições reais de uso, avaliando sua condutividade elétrica e seu comportamento piezoresistivo, estudando por meio da estatística a influência dos ensaios na condutividade do material.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos empregados no desenvolvimento deste trabalho. A execução prática do estudo foi separada em nove etapas, conforme apresentado na metodologia experimental presente na Figura 6.

Figura 6 – Metodologia experimental.



Fonte: elaborada pela autora

3.1 MATERIAIS

O substrato utilizado consistiu em uma malha *spacer* produzida em tear circular de dupla-frontura, composto por filamentos de poliéster nas duas camadas externas (com presença de elastano) e monofilamento de poliéster como fio de ligação. O material foi fornecido pela Indústria e Comércio de Malhas Benvenuti LTDA (BENUTEX Malhas).

Para a polimerização oxidativa *in situ* do polipirrol, empregaram-se o monômero de pirrol líquido (Sigma-Aldrich, massa molar de $67,09 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$), o cloreto de ferro III hexahidratado ($\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e água destilada como meio reacional. No ensaio de solidez à lavagem utilizou-se sabão líquido neutro sem branqueador

(CasaKm), juntamente com água destilada. Já para o ensaio de solidez ao suor ácido e alcalino, foram aplicadas as soluções-padrão fornecidas pela marca Mh3.

Os ensaios de resistência à abrasão, solidez à lavagem e ao suor, bem como as análises de FTIR e MEV, foram realizados com amostras em triplicata de 4 cm de diâmetro. Para o ensaio de solidez à abrasão utilizando o equipamento Pilling Box, foram preparadas amostras também em triplicata, com dimensões de 10 × 12 cm.

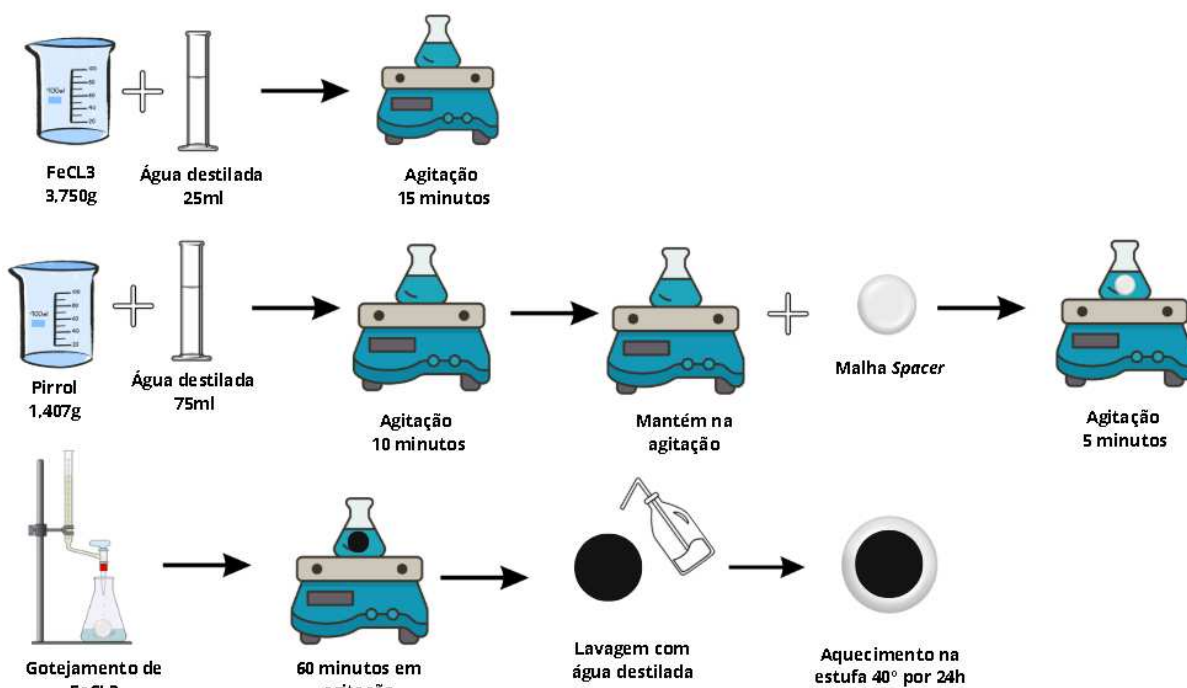
3.2 MÉTODOS

A parte experimental do trabalho foi realizada utilizando os Laboratórios de Tecidos e Malhas (LABTEC), Laboratório de beneficiamento (LABENE), Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE), Laboratório de Desenvolvimento de Produtos Têxteis (LDPT), Laboratório Multiusuários de Caracterização Avançada (LMCA), Laboratório de Transformações e Materiais Avançados (LTMA), (todos no campus Blumenau). Já no campus Florianópolis foram usados o Laboratório de Polímeros e Compósitos (POLICOM), todos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

3.2.1 Obtenção da malha *spacer* revestida com polipirrol

A concentração e o tempo de reação adotados basearam-se na melhor concentração encontrada pelo grupo de pesquisa verificados em trabalhos anteriores de conclusão de curso (Geths (2023) e, Machado (2024)) e pelo mestrado de Ferreira (2024), correspondendo a 3,750 g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ para 1,407 g de PPy, resultando em uma concentração solução de $0,2097 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, na razão molar 0,65 de 2:1 [FeCl_3 :Py], e com tempo de reação de 60 minutos. A Figura 7 ilustra o procedimento experimental da polimerização *in situ*.

Figura 7 – Metodologia da polimerização.



Fonte: elaborada pela autora

Na etapa 1, realizou-se a dissolução do cloreto de ferro III ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) em água destilada durante 15 minutos à temperatura ambiente, utilizando um agitador magnético da marca *New Lab*. Na etapa 2, a malha *spacer* com 4 cm de diâmetro foi preparada. Em seguida, foram adicionados 1,407 g de pirrol líquido e 75 mL de água destilada ao agitador magnético, mantendo a agitação por 10 minutos. Após esse período, a amostra da malha foi inserida na solução e foi agitada por mais 5 minutos, totalizando 15 minutos de procedimento para esta etapa. Na etapa 3, a solução de cloreto ferro III hexahidratado foi adicionada à bureta e vertida lentamente sobre a amostra, que permaneceu em agitação por mais 60 minutos. Após a conclusão da reação, a amostra foi lavada e posteriormente secada em estufa por 24 horas, à temperatura de 40°C .

3.2.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de *Fourier* (FTIR)

Para verificar a efetividade da funcionalização decorrente da polimerização do PPy sobre a superfície das amostras revestidas, empregou-se a técnica de FTIR no modo de refletância total atenuada (ATR). O equipamento utilizado foi o

Espectrofotômetro Frontier, da marca Perkin Elmer, do Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE), da UFSC, campus Blumenau. Os espectros foram registrados na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e utilizando 16 varreduras por amostra. A amostra sem revestimento também foi utilizada para análise.

3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para avaliar a morfologia das malhas, antes e após a funcionalização com polipirrol e após os ensaios de solidez à lavagem, resistência ao suor, análise de formação de *pilling* (pela técnica Pilling Box) e resistência à abrasão (pela técnica Martindale), foram obtidas micrografias por MEV. As análises foram conduzidas em um microscópio da marca JEOL JSM-6390LV, disponível no LMCA-UFSC. As amostras receberam previamente um recobrimento de ouro sobre a superfície, a fim de assegurar a adequada incidência do feixe de elétrons durante a análise. As imagens foram registradas utilizando uma tensão de 8 kV.

3.2.4 Coordenadas colorimétricas

Com o objetivo de quantificar a alteração de cor das amostras após os ensaios de solidez, utilizou-se o equipamento Datacolor D-500, acoplado a um computador no laboratório LINTEX, com o *software* Datacolor Tools. Inicialmente, o equipamento foi calibrado de acordo com as instruções do fabricante, garantindo a precisão das medições. Em seguida, todas as amostras foram analisadas individualmente, registrando-se os parâmetros de cor conforme o sistema CIE $L^*a^*b^*$. As leituras permitiram avaliar alterações na tonalidade e uniformidade das amostras após os revestimentos e ensaios realizados.

3.2.5 Avaliação da alteração de cor

Além da análise colorimétrica instrumental no sistema CIE $L^*a^*b^*$ por meio do equipamento Datacolor, a interpretação dos resultados de variação de cor (ΔE) foi correlacionada com critérios perceptivos conforme estabelecido pela norma ISO 105-

A02:1993 – Grey scale for assessing change in colour. A norma define uma escala de cinza composta por pares de cores com contrastes graduais que representam a magnitude da alteração visível entre uma amostra original e outra submetida a tratamentos/modificações. A escala é dividida em cinco níveis: i. 5: nenhuma mudança perceptível; ii. 4: mudança leve; iii. 3: mudança perceptível; iv. 2: mudança forte; v. 1: mudança muito forte. Desta forma, os valores de ΔE obtidos instrumentalmente foram convertidos em graus de solidez visual, permitindo correlacionar o comportamento colorimétrico e o desempenho estético das amostras sob condições reais de uso simuladas.

3.2.6 Ensaio de resistência à abrasão pelo método Martindale

Para o ensaio de abrasão foi utilizado o equipamento Martindale Abrasion Tester TC 145 da TEXCONTROL, presente no LABTEC, na UFSC, campus Blumenau. O procedimento seguiu a norma ISO 12947-2:2016, com o objetivo de verificar o desgaste das amostras após 5000 ciclos, em triplicadas sendo: sem revestimento e com revestimento. A dimensão das amostras foi de diâmetro de 4 cm, submetidas a uma carga de 12 kPa. As amostras foram pesadas antes e após o ensaio.

3.2.7 Ensaio de solidez à lavagem

Para o ensaio de solidez à lavagem, as malhas *spacer* revestidas com polipirrol foram lavadas 15 vezes, em triplicata, seguindo adaptação da norma ISO 105 C06:2010, com o intuito de analisar a condutividade elétrica das amostras após os ciclos determinados. As amostras foram acondicionadas em *erlenmeyers* contendo água e detergente líquido sem branqueador, na concentração de 4 g.L⁻¹, sem utilização de esferas, durante 30 minutos, a uma temperatura de 40 °C. O equipamento empregado foi o *Shaker* da marca *New Lab*, modelo NL-343-01, disponível no Laboratório de Meio Ambiente (LABMAM), na UFSC, campus Blumenau. As amostras foram pesadas antes e após o ensaio.

3.2.8 Ensaio de solidez ao suor

Para o ensaio de suor foram utilizadas três amostras para cada tipo de suor (ácido e alcalino). As amostras foram colocadas em béqueres com 150 ml de solução, durante 30 minutos. Após o ensaio, as amostras foram retiradas e colocadas para secar na estufa a 40 °C, durante 24 horas.

3.2.9 Ensaio de formação de *pilling* por intermédio do equipamento Pilling Box

Para o ensaio de formação de *pilling* foi utilizado o equipamento PILLI-II-B, da marca Mathis. As amostras em triplicata, seguiram a dimensão definida pela norma ISO 12945-1:2020, 10 cm x 12 cm e o ensaio foi realizado conforme a norma durante, totalizando 7200 rotações, ou seja, durante 2 horas. O ensaio consiste em inserir as amostras em caixas com revestimento de cortiça, que rotacionam no seu próprio eixo, gerando atrito entre o revestimento de cortiça e a superfície da malha.

3.2.10 Condutividade elétrica pelo método de 4 pontas

O ensaio foi realizado no Laboratório de Polímeros e Compósitos (POLICOM), da UFSC, em Florianópolis. Foi utilizado o equipamento Keythley, modelo 6517A, para leitura de tensão com a unidade de fonte de medida (SMU), modelo 2410, com fornecimento da corrente elétrica (1mA) na superfície da malha revestida. Cada amostra foi medida em três posições diferentes em ambos os lados da malha. A resistividade elétrica (ρ) foi calculada por meio da Equação 3 (SCHRODER, 2006), e o valor obtido foi posteriormente utilizado na Equação 4 para determinar a condutividade elétrica (σ) do material.

$$\rho = 4,523 \times E \times \frac{V^2}{I} \quad (3)$$

Sendo:

ρ = resistividade ($\Omega \cdot m$);

I = corrente elétrica (A);

V = tensão elétrica (V);

E = espessura da amostra (m).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

Sendo:

ρ = resistividade ($\Omega.m$);

σ = condutividade $S.m^{-1}$.

Para a realização do ensaio foram utilizados dois equipamentos distintos: um eletrômetro Keythley, modelo 6517A (esquerda) para a leitura da tensão e uma unidade de fonte e medida (SMU) Keythley, modelo 2410 (direita) para o fornecimento da corrente, como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Equipamento para ensaio de condutividade.



Fonte: elaborada pela autora

3.2.11 Ensaio eletromecânico

Para o ensaio eletromecânico, amostras de 2 cm de diâmetro revestidas com polipirrol foram submetidas a 5 ciclos de compressão com tensões de 200 KPa, 300 KPa e 400 KPa, na máquina universal de ensaios EMIC DL 2000, do laboratório de Análises Térmicas do Departamento de mecânica na UFSC, em Florianópolis. Foi usado um eletrômetro Keithley KUSB-488B para aplicar tensão elétrica. O ensaio também variou a taxa de compressão entre $5KPa.s^{-1}$ e $10KPa.s^{-1}$ para visualizar a histerese. Foi obtido as informações por meio do *software* específico do equipamento

utilizado. O ensaio foi realizado a fim de avaliar o comportamento piezoresistivo das malhas. Foram consideradas três amostra polimerizada e três amostra com todos os ensaios. As análises foram feitas usando a Equação 5.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (5)$$

Sendo:

ΔR = variação da resistência;

R_0 = resistência inicial (Ω);

R = resistência (Ω);

3.2.12 Análise integrada dos ensaios experimentais

Com o objetivo de verificar a influência de todos os ensaios realizados de maneira simultânea, e não isoladamente, foram separadas três amostras de malha *spacer* revestidas com polipirrol para a realização dos ensaios: resistência a à abrasão pelo equipamento Martidale, resistência à lavagem, resistência ao suor e a formação de *pilling* por meio do equipamento Pilling Box, resistência a à lavagem, resistência ao suor e resistência a à abrasão pelo equipamento Martidale, seguindo a ordem mencionada.

Quanto ao ensaio de solidez ao suor, optou-se por realizar o teste apenas com o suor ácido, uma vez que este é o tipo de suor mais comum entre os seres humanos, apresentando pH geralmente entre 4,0 e 6,5 (Kim *et al.* 2021; Li *et al.* 2023). Essa escolha torna o ensaio mais representativo das condições reais de uso, permitindo avaliar de forma mais precisa a estabilidade e o desempenho do material condutor em contato com o suor humano. Estudos recentes apontam ainda que o pH do suor pode influenciar o comportamento elétrico e estrutural de materiais condutores aplicados em substratos têxteis, afetando sua estabilidade e desempenho (Zhang *et al.* 2024).

Após a realização de todos os ensaios supracitados, as amostras foram submetidas às análises de Microscopia Eletrônica de Varredura, verificação das coordenadas colorimétricas e ao ensaio eletromecânico.

3.2.13 Análise estatística dos dados

A análise estatística foi realizada no *software* Jamovi (versão 2.5). Inicialmente, foi aplicado o teste de normalidade de *Shapiro–Wilk* para verificar a distribuição das variáveis de condutividade elétrica obtidas após os diferentes ensaios (abrasão, lavagem, suor ácido e *pillling*). Com base nos resultados desse teste, foram selecionados os procedimentos estatísticos adequados a cada conjunto de dados. Para variáveis com distribuição normal, utilizaram-se testes paramétricos, e para variáveis sem distribuição normal, aplicaram-se testes não paramétricos.

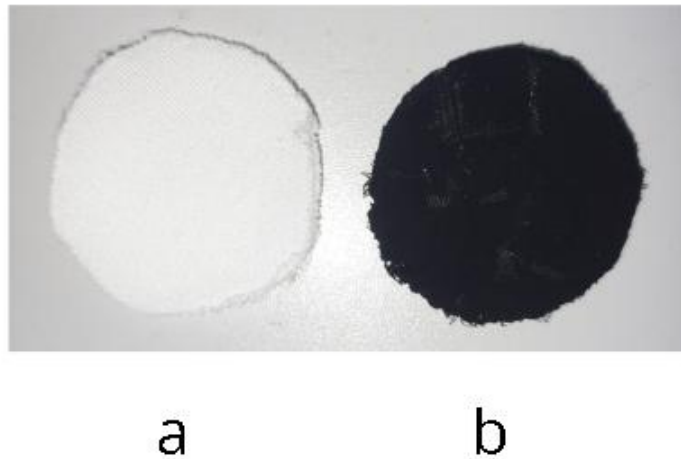
As comparações entre grupos independentes foram conduzidas por meio do teste t-Student (para dados paramétricos) e do teste de Kruskal–Wallis, seguido do teste post hoc de Dunn com correção de Bonferroni (para dados não paramétricos). O nível de significância adotado em todas as análises foi de 5% ($\alpha = 0,05$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 REVESTIMENTO DAS AMOSTRAS DE MALHA *SPACER* COM POLIPIRROL

O processo de polimerização foi realizado conforme descrito na Etapa 3.2.1. Observou-se que, ao longo do processo de polimerização das malhas com PPy, as amostras adquiriram coloração preta (escura), confirmando o revestimento das mesmas, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Malha *spacer* sem (a) e com revestimento (b).

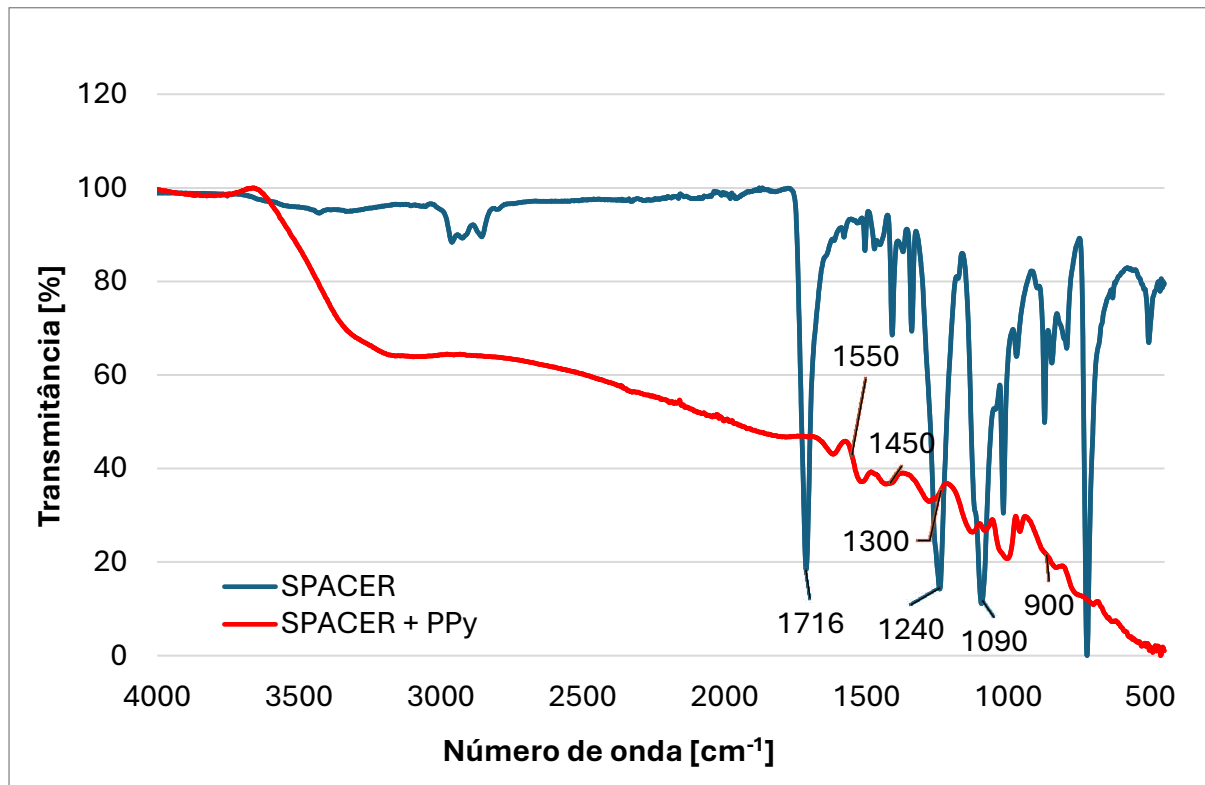


Fonte: elaborada pela autora

4.2 ANÁLISE DA ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE *FOURIER*

Foi realizada a análise de FTIR, na amostra de malha *spacer* sem revestimento e revestida com PPy, com o objetivo de analisar a efetividade da polimerização da PPy na superfície da malha. O estudo revelou diferenças expressivas nas bandas de absorção, indicando modificações químicas significativas após o processo de recobrimento, como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – FTIR da malha *spacer* antes e após revestimento.



Fonte: elaborada pela autora

Na amostra sem revestimento, observou-se bandas em 1716 cm^{-1} , 1240 cm^{-1} e 1090 cm^{-1} , atribuídas, respectivamente, ao estiramento C=O do grupo éster, ao estiramento assimétrico C–O–C e ao estiramento C–O. Além disso, as pequenas variações entre 3100 e 3000 cm^{-1} podem ser associadas aos estiramentos C–H aromáticos e alifáticos, típicos da estrutura do poliéster (Salopek Čubrić *et al.* 2022; Wang *et al.* 2022).

Após o revestimento com polipirrol, observa-se uma expressiva redução da transmitância, principalmente nas regiões abaixo de 2500 cm^{-1} . Essa diminuição indica um aumento da absorção de radiação infravermelha decorrente da presença de novas ligações químicas características do PPy, confirmando a formação de uma camada polimérica condutora sobre as fibras da malha. Esse comportamento é consistente com estudos que relatam menor transmitância em tecidos funcionalizados com PPy, evidenciando uma integração eficiente do polímero ao substrato têxtil (Luo *et al.* 2024).

No espectro da malha *spacer* revestida com PPy, tem-se destaque as regiões próximas de 1550–1450 cm^{-1} , correspondentes aos estiramentos C=C e C–N do anel pirrólico. Também são observadas bandas menos intensas entre 1300 e 900 cm^{-1} , associadas às vibrações C–N e C–H “*wagging*” (termo técnico usado na espectroscopia vibracional, que descreve um tipo específico de vibração molecular) que refletem os modos da formação de bipolaronos no PPy, fenômeno diretamente ligado à sua condutividade elétrica (Luo *et al.* 2024).

4.3 INFLUÊNCIA DA ABRASÃO SOBRE A CONDUTIVIDADE DAS AMOSTRAS

O ensaio de abrasão foi realizado com o objetivo de avaliar se a fricção sobre a superfície das amostras revestidas com PPy iria influenciar na condutividade elétrica das malhas. Foram aplicados 5000 ciclos, sendo o teste interrompido aos 2500 ciclos para análise visual intermediário. A determinação da quantidade de ciclos se deu devido ao desgaste apresentados pelas amostras após 5000 ciclos, onde se observou início de rompimento do material, conforme observado na Figura 10. As amostras sem polimerização foram pesadas antes e após o ensaio e então feita uma média das massas nomeada como (a); já as amostras polimerizadas foram pesadas e tiveram sua média nomeada como (b). Os resultados são apresentados na Tabela 1.

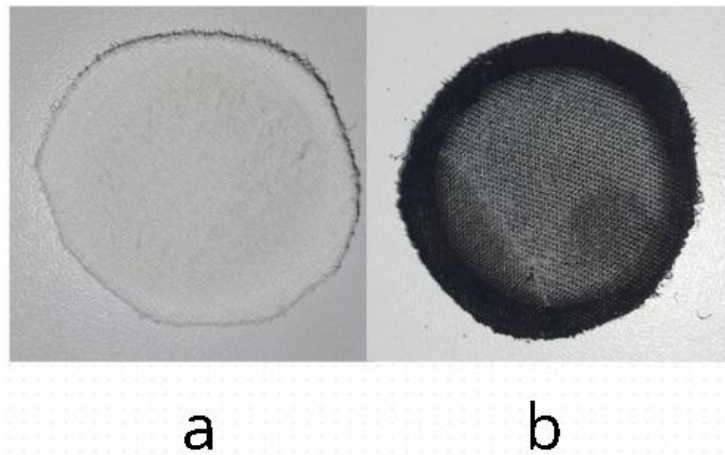
Tabela 1 – Média da perda de massa das amostras: sem (a) e com revestimento (b) após ensaio de resistência à abrasão

Amostra	Massa inicial(g)	Massa final(g)	Perda de massa (%)	Desvio padrão
a	0,640	0,630	1,562	+0,005
b	0,690	0,650	5,797	+0,02

Fonte: elaborado pela autora

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que houve descoloração das amostras revestidas, associada à redução da intensidade da cor preta, sugerindo perda de material condutor na superfície (Figura 11 (a)). Já nas amostras sem polimerização observou-se o início do rompimento da fibra com um maior de desgaste comparando-a com a amostra revestida (Figura 11 (b)).

Figura 11 – Amostras: sem (a) e com revestimento (b) após 5000 ciclos do ensaio de abrasão.

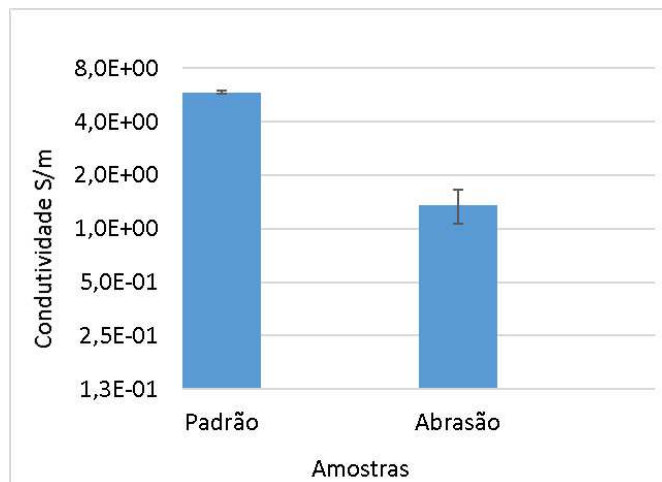


Fonte: elaborada pela autora

No presente estudo, as amostras revestidas com PPy submetidas ao ensaio de abrasão apresentaram condutividade média próxima a 2 S.m^{-1} , evidenciando redução em relação à amostra de referência (polimerizada), que apresentou uma condutividade média de 6 S.m^{-1} (Figura 12).

Esses resultados estão em concordância com estudos verificados na literatura, que apontam que revestimentos com polipirrol em malhas ou outros substratos têxteis tendem a apresentar redução da condutividade elétrica ou aumento da resistividade sob esforços repetitivos de fricção e abrasão. Por exemplo, Liu *et al.* (2018) verificaram aumento de aproximadamente 74 % na resistividade após ensaio de fricção em tecido de algodão revestido com PPy. De forma semelhante, Khattab *et al.* (2023) observaram que tecidos de lã revestidos com PPy apresentaram redução significativa da condutividade após ciclos de abrasão, devido à degradação da superfície condutiva. Além disso, Li *et al.* (2023) mostraram que o desempenho condutor e a durabilidade de tecidos recobertos com PPy variam conforme o tipo de substrato e o método de deposição, influenciando sua resistência mecânica e estabilidade elétrica.

Figura 12 – Condutividade elétrica das amostras revestidas antes e após 5000 ciclos de abrasão.



Fonte: elaborada pela autora.

Foi observado que o atrito promoveu desgaste moderado e remoção parcial do revestimento condutor, mas sem comprometer a continuidade da condução elétrica. De acordo com Wang *et al.* (2022) e Patel *et al.* (2023), danos por atrito são comuns em tecidos condutores submetidos a esforços cíclicos, resultando em perda parcial de desempenho elétrico. Entretanto, o comportamento observado neste estudo indica que o revestimento de PPy, preservou parte significativa da condutividade mesmo após o desgaste.

Assim, embora a abrasão represente um fator importante para a durabilidade elétrica do material, o sistema desenvolvido demonstrou bom equilíbrio entre resistência mecânica e estabilidade elétrica, reforçando o potencial de aplicação do revestimento condutivo em condições reais de uso que envolvam atrito e movimentação têxtil.

4.4 VERIFICAÇÃO DA CONDUTIVIDADE APÓS CICLOS DE LAVAGEM

As amostras foram pesadas antes e após os ciclos de lavagem, e a partir dos resultados foi feita uma média que é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Média da perda de massa das amostras: sem (a) e com revestimento (b) após 15 ciclos de lavagem

Massa inicial(g)	Massa final(g)	Perda de massa (%)	Desvio padrão
0,670	0,610	8,955	+0,03

Fonte: elaborado pela autora

Observou-se uma redução moderada na massa das amostras, possivelmente associada à remoção do polímero, correspondendo a uma perda média de aproximadamente 8,955% da massa inicial. Apesar da redução, o revestimento de PPy manteve-se bem aderido à superfície têxtil, apresentando apenas clareamento visual em algumas partes. Esse comportamento indica um desgaste superficial da do polipirrol depositado. A Figura 13 apresenta a aparência da amostra após 15 ciclos de lavagem.

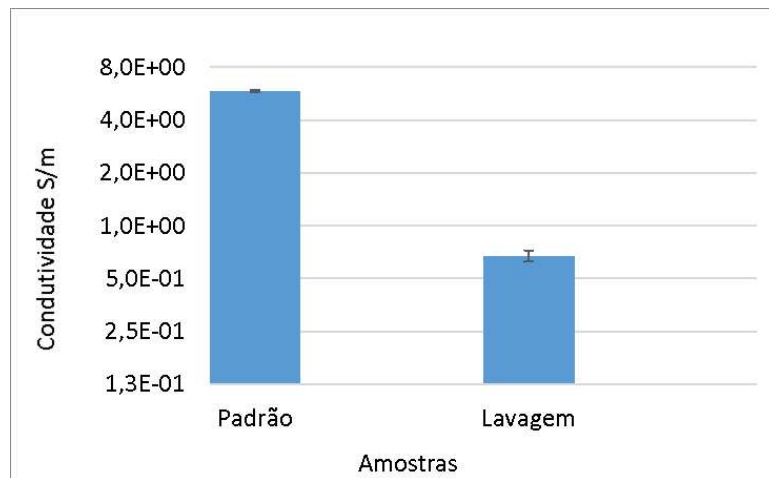
Figura 13 – Amostra revestida com PPy após 15 ciclos de lavagem.



Fonte: elaborada pela autora

A análise da condutividade elétrica permite avaliar a estabilidade funcional do material após a lavagem. Os resultados estão presentes no gráfico apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Condutividade elétrica das amostras antes e depois da polimerização, após 15 ciclos de lavagem.



Fonte: elaborada pela autora

Ao comparar a média das amostras de referência (apenas polimerizada) com a média das amostras submetidas ao ensaio de lavagem, verifica-se que as amostras lavadas exibiram valores inferiores a 1 S.m^{-1} .

Mesmo após 15 ciclos de lavagem, observou-se uma redução de aproximadamente 12 % na condutividade elétrica, valor semelhante à perda de massa média de 12,07 % registrada no mesmo ensaio. Esse resultado indica que, embora tenha ocorrido leve degradação do revestimento condutivo, as amostras mantiveram a integridade estrutural da malha e uma parcela significativa do revestimento condutor, evidenciando adequada adesão do PPy ao substrato. Esse comportamento está de acordo com estudos que relatam que diferentes tecidos revestidos com polipirrol podem suportar múltiplos ciclos de lavagem com perdas limitadas de desempenho elétrico e mecânico, desde que o processo de polimerização e fixação do polímero seja apropriado (Liu *et al.* 2024; Chen *et al.* 2022). Por exemplo, Liu *et al.* (2024) observaram que tecidos de algodão e poliéster mantiveram variações inferiores a 20% na resistência elétrica após 10 ciclos de lavagem, enquanto Chen *et al.* (2022) relataram manutenção da condutividade funcional mesmo após 20 ciclos, com resistência inferior a $150 \Omega.\text{sq}^{-1}$.

4.5 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO SUOR SOBRE AS AMOSTRAS REVESTIDAS

A avaliação da resistência ao suor é essencial para determinar a durabilidade e a estabilidade das cores em tecidos expostos ao suor humano. O pH do suor humano varia entre 4,7 e 6,6, mas pode atingir até pH 9 em condições específicas, como em pacientes com fibrose cística (Ghadge *et al.* 2024). Para simular essas condições, os testes de resistência ao suor utilizam soluções artificiais com pH ácido (aproximadamente 5,5) e alcalino (cerca de 8,0). Estudos demonstraram que amostras tingidas em pH ácido apresentaram maior resistência ao suor ácido, com classificação de 4 a 4–5 na escala de cinza, enquanto amostras tingidas em pH alcalino mostraram maior liberação de corante sob condições alcalinas (Moula *et al.* 2022).

No caso específico da malha *spacer* revestida com PPy, a escolha dessas soluções é crucial para verificar a estabilidade da cor e se ocorre perda de condutividade elétrica quando o substrato está em contato com o corpo humano. Portanto as amostras de malha *spacer* revestidas com polipirrol foram submetidas ao ensaio de resistência ao suor ácido e alcalino, conforme descrito na metodologia. As massas das amostras antes e após o ensaio estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Média da perda de massa das amostras após os ensaios de resistência ao suor: ácido (a), alcalino(b).

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (%)	Desvio padrão
a	0,700	0,690	1,428	+0,005
b	0,700	0,690	1,428	+0,005

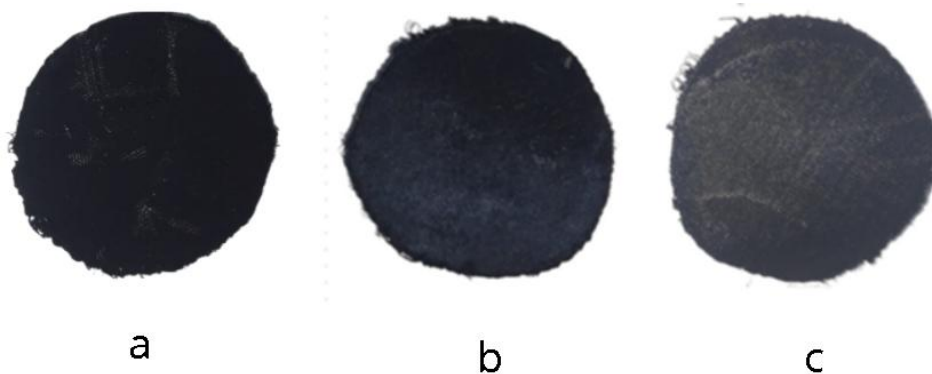
Fonte: elaborado pela autora

Foi observado uma média variação de massa de 1,428% indicando que o revestimento sofreu pequenos desgastes ao decorrer dos testes. Além da perda de massa em ambos os ensaios, observou-se que a solução de suor ácido adquiriu tonalidade avermelhada, porém sem alterar a coloração do revestimento indicando interação entre o meio ácido e o revestimento condutor.

Após a secagem, as amostras referentes ao suor ácido apresentaram discretas alterações visuais, com o surgimento de áreas levemente esbranquiçadas,

conforme pode ser verificado na Figura 15 (b). Já as amostras ensaiadas no suor alcalino apresentaram aparência mais opaca e esbranquiçada, indicando pequenas modificações superficiais no revestimento de polipirrol, sem prejuízo visível à integridade da malha, conforme mostrado na Figura 15 (c).

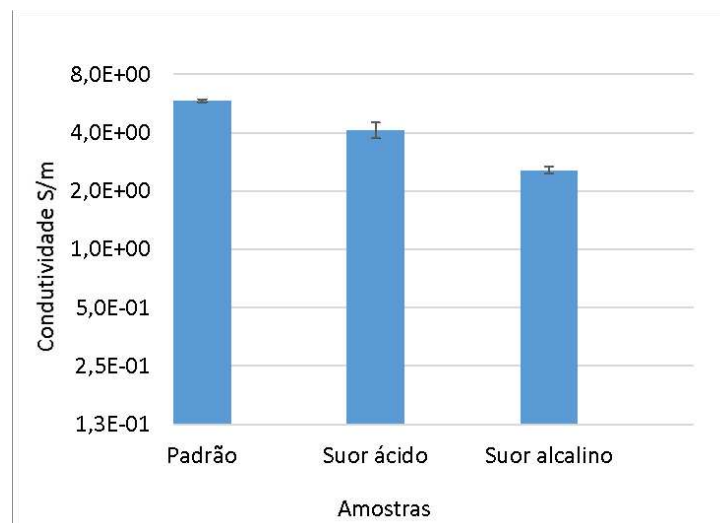
Figura 15 – Amostra revestida (a), revestida após ensaio ao suor ácido (b) e alcalino (c).



Fonte: elaborada pela autora

Concluído os ensaios de suor, as amostras foram avaliadas quanto à condutividade elétrica pelo método das quatro pontas, e os resultados correspondentes estão apresentados em um gráfico presente na Figura 16.

Figura 16 – Condutividade elétrica das amostras antes e depois da polimerização, após exposição à suor ácido e alcalino.



Fonte: elaborada pela autora

A partir dos dados dispostos na Figura 16, observou-se que a amostra revestida submetida ao ensaio de suor ácido apresentou condutividade ligeiramente inferior à da amostra de referência (malha apenas polimerizada), com diferença aproximada de 2 S.m^{-1} . Esta variação pode estar relacionada à influência do pH ácido sobre o PPy, promovendo pequenos rearranjos superficiais nas cadeias poliméricas sem comprometer sua condutividade. Ainda assim, o material manteve continuidade elétrica e aparência homogênea, demonstrando resistência química satisfatória em meio ácido. Resultados semelhantes foram descritos por Zhang *et al.* (2021), que também observaram reduções controladas de condutividade em diferentes tecidos com PPy expostos a soluções ácidas leves, sem perda significativa de desempenho.

Por outro lado, a amostra em exposição à solução alcalina, apresentou uma maior redução da condutividade ficando aproximadamente com $7,0\text{E}^{-1} \text{ S.m}^{-1}$, valor que, embora inferior ao da amostra padrão e da amostra ensaiada no suor ácido, ainda se encontra condutor. Essa diminuição pode estar relacionada à ação do pH básico promover rearranjos estruturais nas cadeias do PPy, afetando parcialmente a mobilidade de carga. Mesmo com essa variação, o material manteve continuidade elétrica e boa estabilidade superficial, demonstrando a eficiência do revestimento frente a condições químicas mais severas.

4.6 ANÁLISE DE ENSAIO DE FORMAÇÃO DE *PILLING* SOBRE AMOSTRAS REVESTIDAS

Durante o ensaio de *pilling*, não se observou a formação de bolinhas superficiais (*pills*), porém as amostras apresentaram leve desgaste do revestimento, opacidade e clareamento na camada revestida (Figura 17). As massas das amostras antes e após o ensaio estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Média da perda de massa das amostras após os ensaios de formação de *pilling*.

Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (%)	Desvio padrão
0,670	0,640	4,477	+0,015

Fonte: elaborado pela autora

Figura 17 – Amostra revestida após ensaio de formação de *pilling* por intermédio do equipamento Pilling box

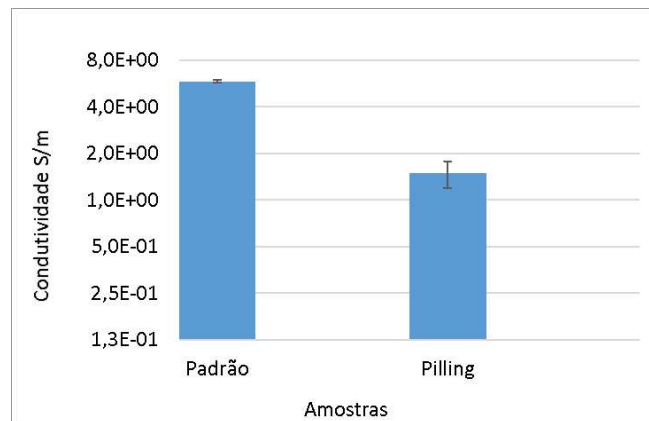


Fonte: elaborada pela autora

A diminuição da massa reflete a ação abrasiva do contato contínuo, que pode causar desprendimento superficial do polipirrol e desgaste físico na amostra. Ainda assim, o revestimento manteve boa integridade estrutural e aderência à malha, demonstrando resistência satisfatória ao desgaste mecânico leve. Estudos de Luo *et al.* (2024) e Živičnjak *et al.* (2025) corroboram esse comportamento, relatando que revestimentos de PPy podem apresentar pequenas perdas de material sob fricção.

A formação de *pilling* é atribuída à aglomeração de fibras soltas na superfície, fenômeno típico de malhas submetidas a atrito repetitivo (Tokarska *et al.* 2024). Embora o efeito estético não tenha sido perceptível, também não foi observado dano severo ao revestimento, sugerindo que o PPy manteve boa coesão sobre o substrato. A análise da condutividade elétrica foi realizada pelo método de quatro pontas, permitindo avaliar o efeito do ensaio de formação de *pilling* por intermédio do equipamento Pilling Box sobre as propriedades elétricas das amostras revestidas com polipirrol. Os valores médios obtidos estão apresentados na figura 18.

Figura 18 – Condutividade elétrica das amostras antes e depois da polimerização, após exposição ao ensaio de *pilling*.



Fonte: elaborada pela autora

A amostra obtida após o ensaio de formação de *pilling*, apresentou condutividade média aproximada de 1,8 S.m⁻¹, relativamente inferior a condutividade apresentada pela amostra referência. Por maior que seja a diferença obtida entre a análise da amostra testada e a amostra referência ambas apresentam valores que se encontram na faixa reportada na literatura para tecidos condutores à base de polipirrol (entre 1 e 10 S.m⁻¹), conforme Liu *et al.* (2022) e Zhang *et al.* (2023).

A diminuição presente da condutividade na amostra testada pode ser atribuída à ação mecânica do atrito, que tende a causar desgaste superficial na camada condutora. No entanto, mesmo após o ensaio, o tecido manteve condutividade significativa, o que demonstra uma adesão eficiente do polímero à fibra têxtil e boa resistência mecânica do revestimento.

Resultados semelhantes foram observados por Patel *et al.* (2023) e Wang *et al.* (2022), que relatam que o atrito repetitivo pode reduzir parcialmente a condutividade de tecidos revestidos com PPy, sem, contudo, eliminar totalmente a funcionalidade elétrica. Assim, a amostra analisada apresentou bom desempenho eletromecânico, preservando condutividade suficiente mesmo após o estresse físico imposto pelo *pilling*, o que evidencia potencial para aplicações em têxteis inteligentes sujeitos a esforços mecânicos moderados.

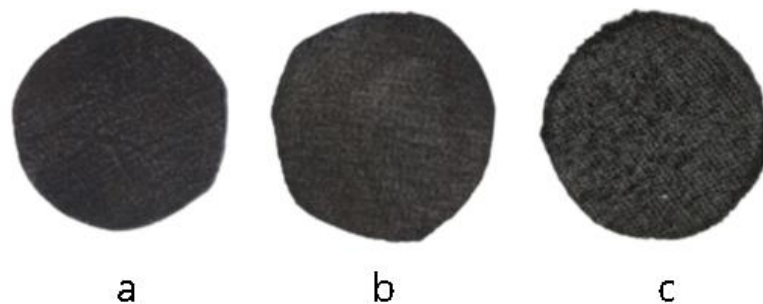
4.7 DISCUSSÃO INTEGRADA DOS DADOS EXPERIMENTAIS

A avaliação das amostras de malha *spacer* revestidas com PPy foi conduzida de forma separada e integrada, abrangendo os ensaios de resistência à lavagem, resistência ao suor ácido, abrasão e formação de *pilling*. A abordagem integrada foi adotada por permitir uma compreensão mais ampla do comportamento do revestimento condutores, considerando a atuação simultânea de diferentes agentes de degradação que podem ocorrer em condições reais de uso. Essa análise conjunta possibilita avaliar de maneira mais confiável a durabilidade e o desempenho funcional do PPy ao longo do tempo.

Cada ensaio impõe um tipo específico de estresse mecânico, químico ou físico e, portanto, fornece informações complementares sobre a estabilidade do revestimento. Enquanto os testes de *pilling* e abrasão investigam a resistência ao atrito e à integridade superficial, os ensaios de lavagem e suor ácido avaliam a adesão e a estabilidade química do polímero condutores. A combinação dos resultados permite uma visão mais completa do desempenho global das amostras, assegurando que o material mantenha suas propriedades condutivas e estruturais sob diferentes condições de aplicação.

Após a passagem das amostras pelo conjunto dos ensaios de formação de *pilling*, resistência à lavagem e resistência ao suor ácido, foram observadas alterações visuais significativas nas amostras de malha *spacer* revestidas com polipirrol. A Figura 19 apresenta o aspecto superficial das amostras após cada etapa experimental.

Figura 19 – Amostras após: lavagem e *pilling* (a), lavagem, *pilling* e suor ácido (b), lavagem, *pilling*, suor ácido e abrasão (c)



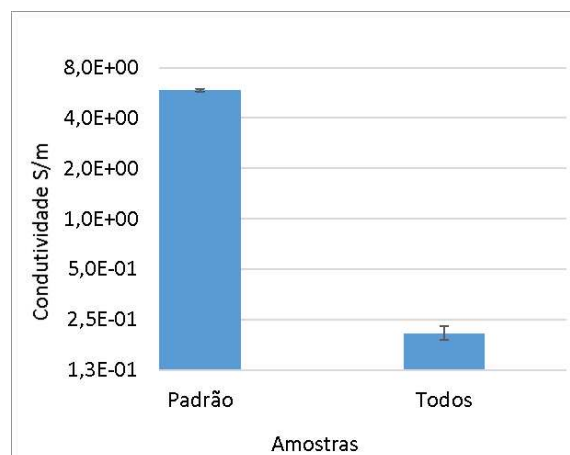
Na amostra (Figura 19 (a)), verificou-se leve desgaste superficial. Esse comportamento é comum em tecidos revestidos com polímeros condutores, uma vez que a fricção mecânica durante o *pilling* promove deslocamento parcial das cadeias poliméricas da superfície têxtil (Wang *et al.* 2022). Além disso, o processo de lavagem tende a remover resíduos superficiais e partes menos aderidas do revestimento, resultando em uma aparência ligeiramente opaca (Zhou *et al.* 2023).

Já na amostra (Figura 19 (b)), observou-se uma alteração um pouco mais pronunciada no aspecto visual. As superfícies apresentaram coloração levemente esbranquiçada, especialmente na região central.

Na amostra (Figura 19 (c)), as alterações visuais presentes foram mais acentuadas. Observou-se desgaste da superfície, bordas com fibras soltas e coloração esbranquiçada em várias regiões. Esse comportamento evidencia o efeito cumulativo da ação mecânica e química sobre o revestimento condutor, indicando degradação parcial do polipirrol.

Além das observações visuais, a condutividade elétrica das amostras foi analisada pelo método de quatro pontas, a fim de avaliar a influência dos diferentes ensaios físico-químicos sobre as propriedades elétricas das malhas polimerizada. Foram analisadas amostras submetidas a todos os testes combinados a uma amostra de referência. Os valores médios de condutividade elétrica e os respectivos desvios-padrão encontram-se apresentados na Figura 20

Figura 20 – Condutividade elétrica das amostras polimerizadas, antes e após integração dos ensaios.



Fonte: elaborada pela autora

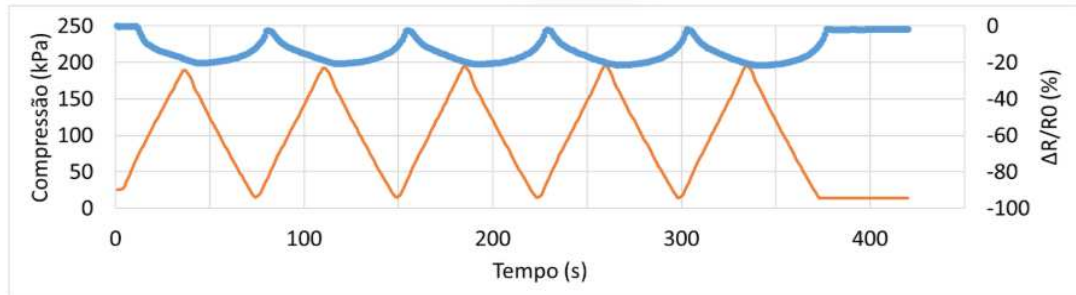
Mesmo com a redução cumulativa causada pela ação simultânea de agentes químicos e mecânicos, a condutividade residual evidencia que a polimerização ainda mantém boa condutividade elétrica, demonstrando boa resistência do compósito à degradação integrada.

4.8 ENSAIO ELETROMECAÂNICO DAS AMOSTRAS PASSADAS PELO CONJUNTO DE ENSAIOS

A resposta piezorresistiva das amostras foi avaliada sob diferentes condições de compressão (200, 300 e 400 kPa) e taxas de carregamento (5 e 10 kPa/s), por meio da variação da resistividade elétrica relativa ($\Delta R/R_0$) em função do tempo e da tensão de compressão aplicada, conforme mostrado nas Figuras 21 a 24. As imagens (a) correspondem à malha apenas polimerizada, enquanto as figuras (b) representam a malha polimerizada submetida a todos os testes complementares em conjunto (suor, lavagem, *pilling* e abrasão).

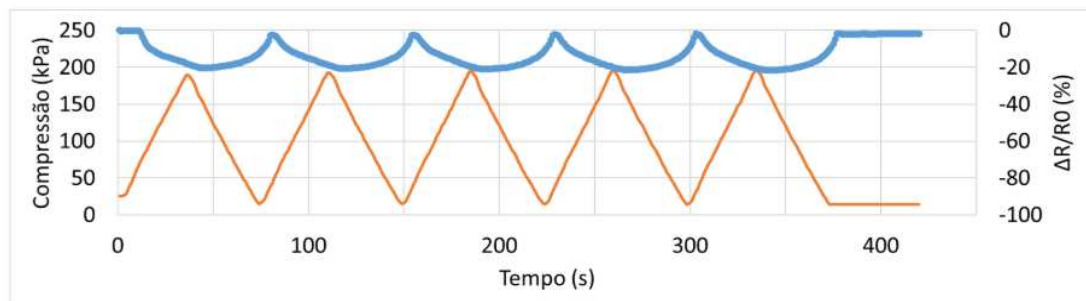
Analisando a Figura 21, verifica-se que após a realização dos ensaios, a amostra testada apresentou respostas elétricas expressivas frente às variações mecânicas impostas. A cada ciclo de compressão há um aumento acentuado de $\Delta R/R_0$, atingindo amplitudes aproximadas de 150 %, o que indica uma forte sensibilidade piezorresistiva do revestimento de PPy quando o substrato é deformado de forma cíclica. A amostra de referência (a) apresentou $\Delta R/R_0$ praticamente constante ao longo do tempo, evidenciando estabilidade elétrica. Esse comportamento é esperado, pois, ao não ser submetido a ensaios que degradam a superfície do substrato, o revestimento de PPy mantém a integridade das suas rotas condutoras. Assim, na ausência de ensaios prévios, a resistência elétrica permanece estável, refletindo a condição original do material após a polimerização.

Figura 21 – Malha *spacer* revestida com PPy: resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % e tensão de compressão em 200kPa em função do tempo de ensaio com uma taxa de carregamento de 5 kPa/s: (a) amostra revestida; (b) amostra após a realização dos ensaios.



(a)

● variação da compressão
● variação da resistividade

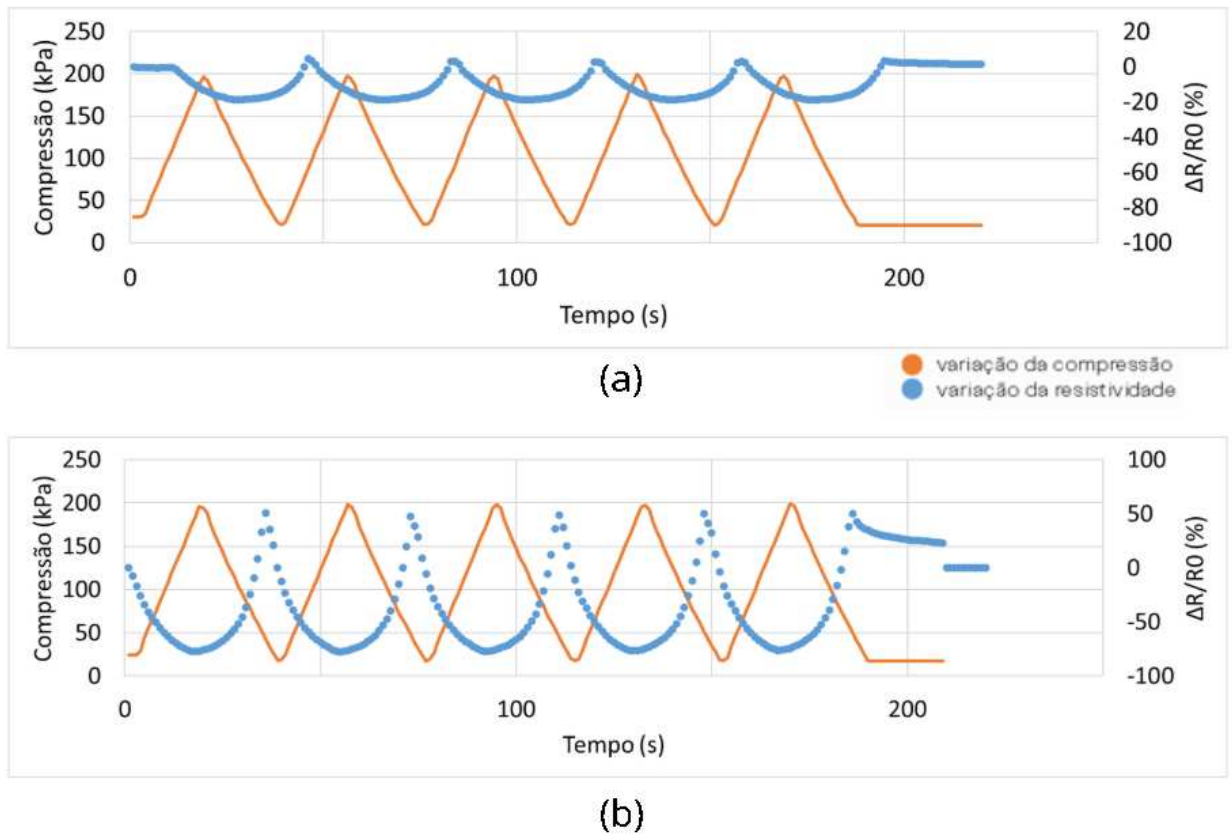


(b)

Fonte: elaborada pela autora

Em 200 kPa e 10 kPa/s (Figura 22), observa-se que o aumento da taxa de compressão resultou em uma menor amplitude da variação de resistividade quando comparada com os gráficos da Figura 21. No entanto, a amostra (Figura 22 (a)) manteve um padrão de resposta mais estável, enquanto a amostra (Figura 22 (b)) apresentou picos de $\Delta R/R_0$ mais dispersos. Esse comportamento sugere que a amostra submetida ao ensaio apresenta maior capacidade de dissipar a tensão aplicada e recuperar-se elasticamente após a deformação. Tal resposta indica uma interação adequada entre o PPy e o substrato têxtil, favorecendo a manutenção das rotas condutoras mesmo sob compressão cíclica. Esse resultado está alinhado ao observado por Liu et al. (2022), que destaca, que a boa adesão entre o polímero condutor e as fibras reduz a defasagem entre carregamento e resposta elétrica, contribuindo para maior estabilidade e durabilidade de sensores têxteis piezoresistivos.

Figura 22 – Malha *spacer* revestida com PPy: resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % e tensão de compressão em 200kPa em função do tempo de ensaio com uma taxa de carregamento de 10kPa/s: (a) amostra revestida; (b) após a realização dos ensaios.

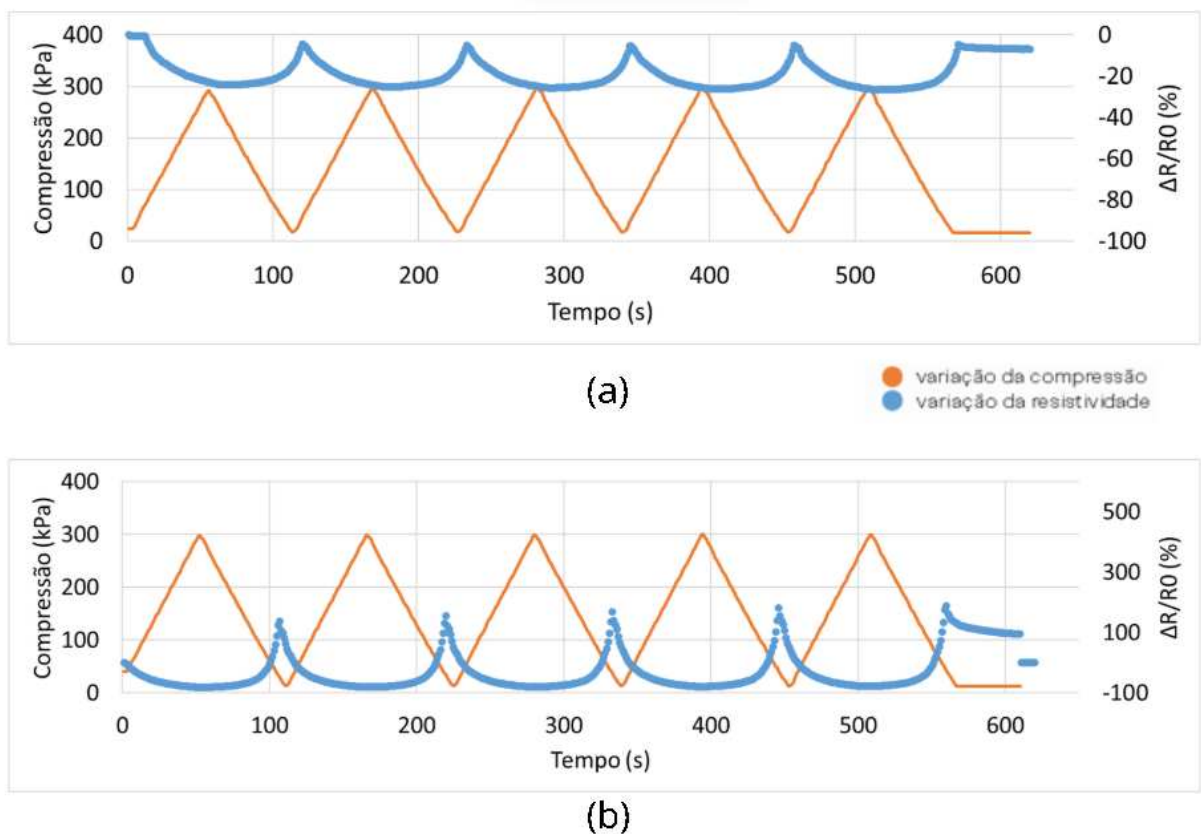


Para 300 kPa e 5 kPa/s (Figura 23), a amostra ensaiada (Figura 23 (b)) apresentou redução relativa da amplitude de $\Delta R/R_0$ e menor recuperação do valor de resistência entre ciclos. Tal comportamento pode ser atribuído ao início da saturação dos contatos condutores entre as fibras revestidas e à compactação estrutural do substrato. À medida que a malha perde parte de sua capacidade de recuperação elástica, a reorganização dos caminhos elétricos torna-se limitada. Conseqüentemente, a variação resistiva frente à deformação mecânica diminui, reduzindo a sensibilidade piezoresistiva do material.

A amostra de referência (Figura 23 (a)) apresentou menor variação de $\Delta R/R_0$ durante os ciclos de compressão e descompressão quando comparada com a Figura 23 (b), pois, ao não ter sido submetida aos ensaios de solidez, mantém o revestimento

de PPy estruturalmente íntegro e conseqüentemente com rotas condutoras mais contínuas. Assim, a resposta elétrica permanece estável, sem alterações significativas da linha de base, o que permite isolar o efeito puramente mecânico da compressão. Esse comportamento está de acordo com estudos que relatam que materiais condutores não degradados tendem a apresentar menor sensibilidade piezoresistiva sob compressão elevada, devido à menor necessidade de reconfiguração das rotas elétricas existentes (Li *et al.* 2018; Wang *et al.* 2022).

Figura 23 – Malha *spacer* revestida com PPy: resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % e tensão de compressão em 300kPa em função do tempo de ensaio com uma taxa de carregamento de 5 kPa/s: (a) amostra revestida; (b) após a realização dos ensaios.



Fonte: elaborada pela autora

De forma comparativa, ao analisar a amostra ensaiada do padrão pode-se afirmar que a malha polimerizada após a realização de todos os ensaios (Figura 24 (b)) apresenta variações de $\Delta R/R_0$ mais acentuadas durante os ciclos de compressão, indicando maior sensibilidade piezoresistiva. Esse comportamento pode estar

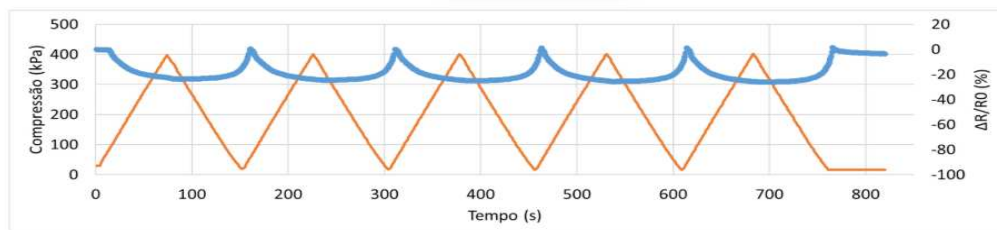
relacionado às alterações estruturais causadas pelos ensaios de solidez, que modificam a distribuição do PPy e tornam os caminhos condutores mais suscetíveis à deformação mecânica, ampliando a resposta elétrica ao estímulo.

Já a malha apenas polimerizada (Figura 24 (a)) demonstra menor amplitude de variação e comportamento mais estabilidade ao longo do tempo, o que é esperado devido à integridade do revestimento condutor e à ausência de degradação estrutural. Embora apresente menor sensibilidade, exibe boa repetitividade e estabilidade elétrica.

De maneira geral, pode-se afirmar que a malha polimerizada e que foi submetida aos ensaios apresenta uma resposta piezorresistiva mais variável, com picos mais elevados, possivelmente devido à menor adesão entre as cadeias de polipirrol e à maior presença de espaços vazios entre as fibras. Já a malha apenas polimerizada demonstra uma resposta mais estável, linear e.

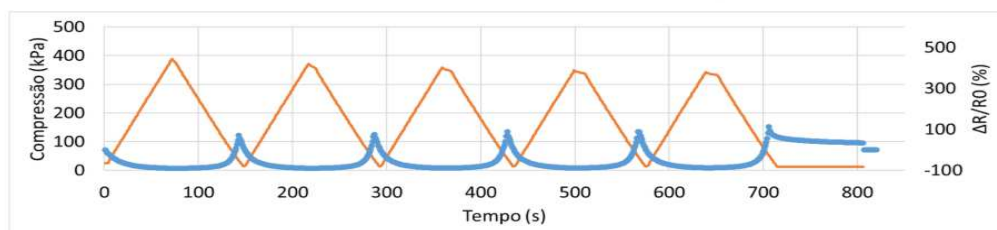
Esses resultados corroboram estudos recentes sobre tecidos condutores à base de polipirrol, que destacam que o desempenho eletromecânico está intimamente relacionado à homogeneidade do revestimento, adesão interfacial e continuidade das vias condutoras (Huang *et al.* 2023; Wang *et al.* 2022; Liu *et al.* 2022).

Figura 24 – Malha *spacer* revestida com PPy: resposta piezorresistiva ($\Delta R/R_0$) em % e tensão de compressão em 400KPa em função do tempo de ensaio com uma taxa de carregamento de 5 kPa/s: (a) amostra revestida; (b) após a realização dos ensaios.



(a)

● variação da compressão
● variação da resistividade



(b)

Fonte: elaborada pela autora

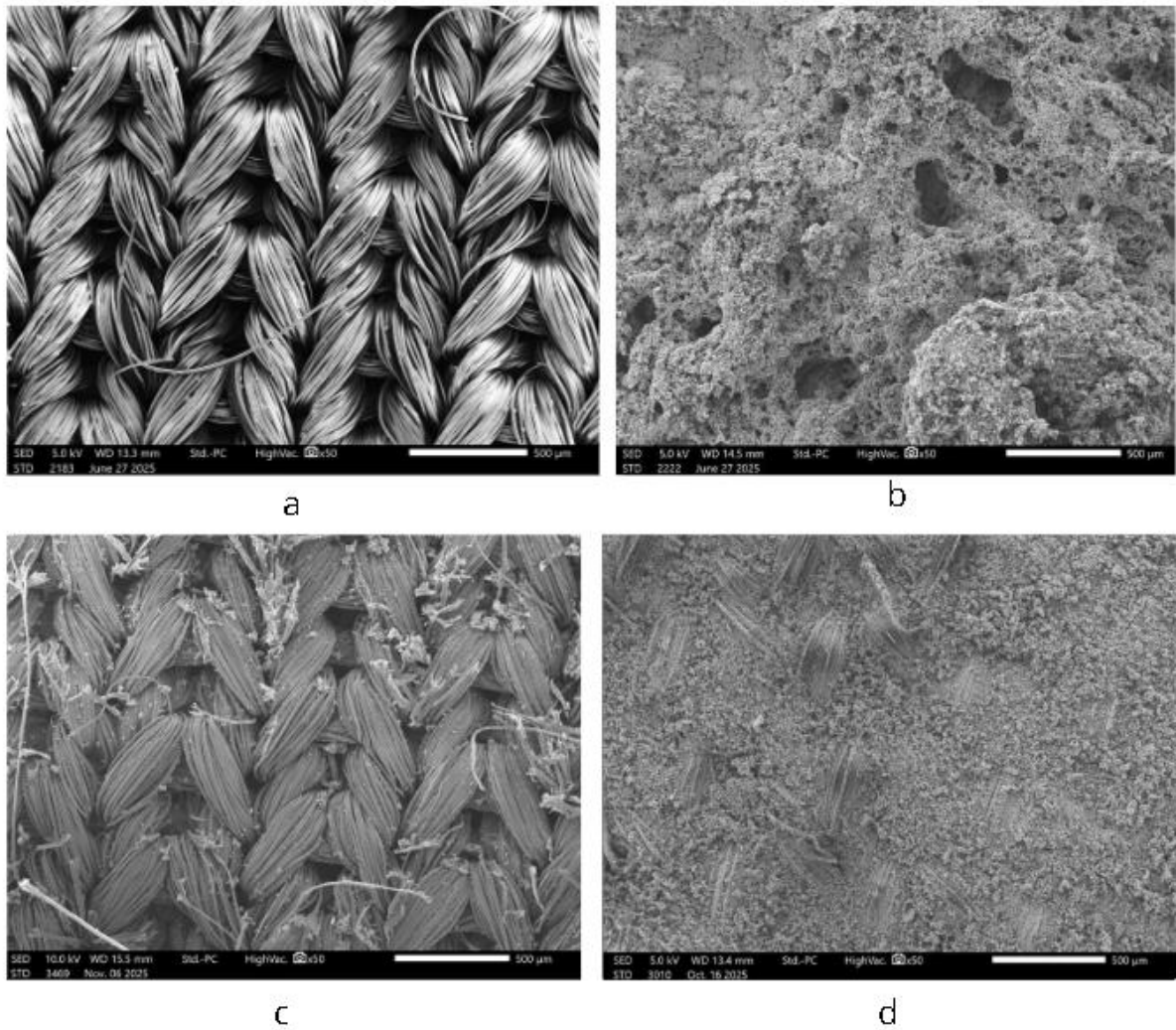
4.9 ANÁLISE VISUAL E COMPARATIVA

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a análise das coordenadas colorimétricas, foi realizada para compreender e quantificar as correlações entre as alterações visuais e morfológicas das amostras revestidas com PPy e a consequente variação de sua condutividade elétrica em decorrência a desgastes físicos e químicos. A aplicação destas técnicas possibilitou uma observação detalhada dos efeitos desgaste decorrentes dos ensaios de simulação de uso realizados nas amostras.

4.9.1 Análise de microscopia eletrônica de varredura

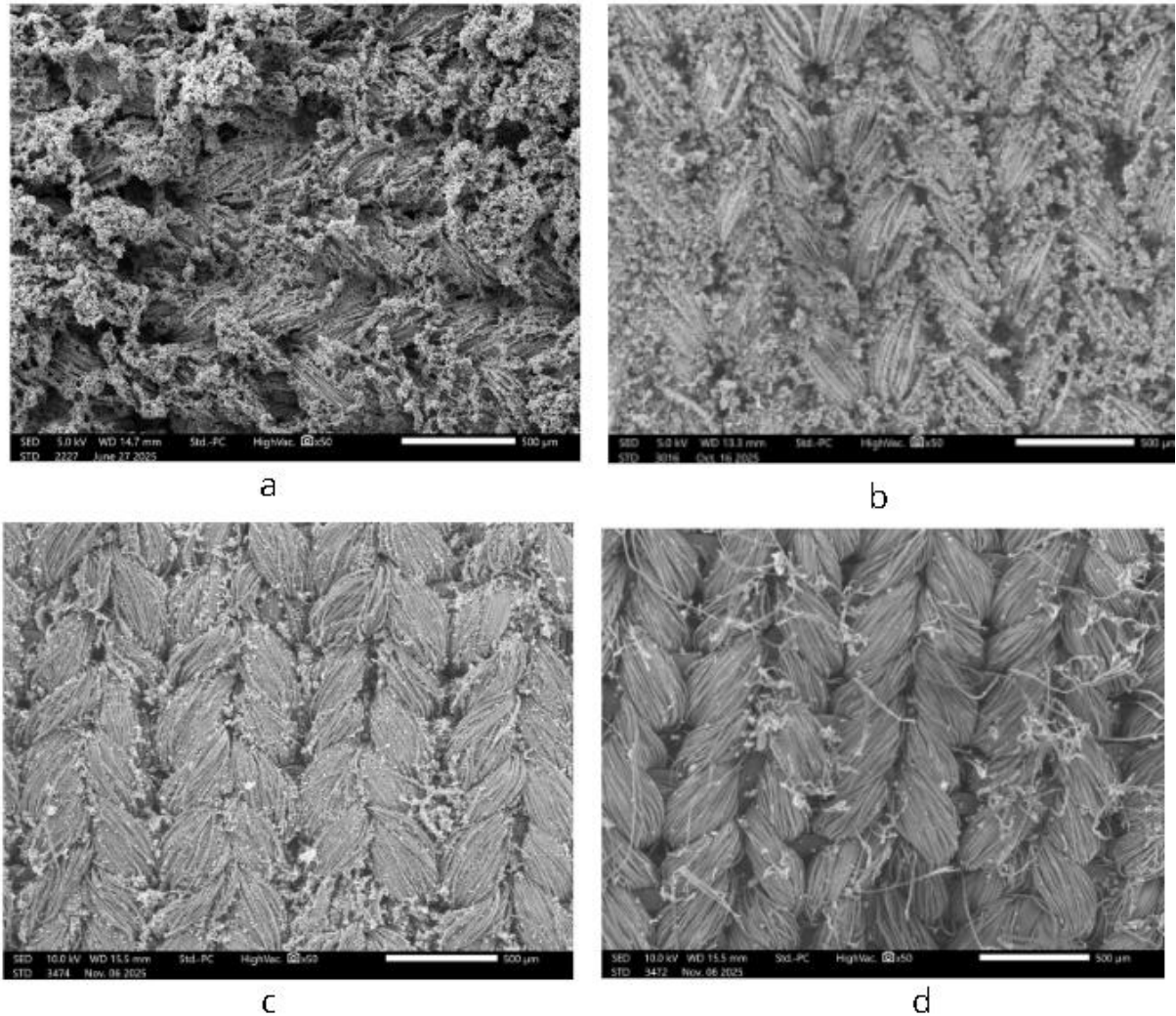
As imagens de MEV permitiram observar diferenças marcantes entre a malha *spacer* sem polimerização, a malha polimerizada e as amostras submetidas aos diferentes ensaios (Figura 25 e 26). A amostra sem polimerização apresenta fibras lisas e bem definidas, com espaçamento regular e sem a presença de partículas aderidas, representando o substrato têxtil de referência (Figura 25 (a)). Na amostra polimerizada (Figura 25 (b)), observa-se a presença do revestimento sobre as fibras, característico do polipirrol depositado pela polimerização *in situ*. Essa morfologia, de aspecto “*cauliflower*” (termo visual usado para descrever como o PPy está presente na amostra, mostrando aglomerados esféricos ou nodulares que lembram uma couve-flor), está de acordo com o observado por Wang (2022) e Luo (2024), que associam esse padrão à estrutura típica do PPy e à formação de caminhos condutores entre partículas.

Figura 25 – Micrografias das amostras: sem polimerização(a); amostra polimerizada (b); após 5000 ciclos de abrasão (c); após 15 ciclos de lavagem (d).



Fonte: elaborada pela autora

Figura 26 – Micrografias das amostras: após ensaio de resistência ao suor ácido (a), após ensaio de resistência ao suor alcalino (b); ensaio formação de *pilling* (c) e após a integração de todos os ensaios (d).



Fonte: elaborada pela autora

Na amostra revestida com PPy (Figura 25(b)), observa-se a deposição do polímero sobre as fibras, que resulta em uma aparência mais homogênea e contínua.

Nas amostras após 5000 ciclos de abrasão (Figura 25(c)), verifica-se desgaste mecânico mais evidente, com áreas onde o revestimento foi removido. A amostra submetida à 15 ciclos de lavagem (Figura 25(d)) apresentam pequenas regiões com desprendimento parcial do revestimento, revelando áreas de fibra exposta. Apesar dessas pequenas alterações, a maior parte do revestimento permaneceu intacta, mantendo condutividade significativa.

A imagem da amostra exposta ao suor ácido (Figura 26 (e)) é possível observar a deposição do polímero sobre a fibra de forma contínua. Na imagem da amostra submetida ao suor alcalino (Figura 26 (f)) observa-se uma pequena perda da camada condutora. Apesar disso, grande parte da superfície manteve o revestimento condutor, indicando que a degradação foi controlada e localizada.

O ensaio de formação *pilling* (Figura 26 (g)) reforça esse efeito, apresentando grande remoção do polímero, evidenciando fragilidade localizada do filme sob fricção repetida. Por fim, a amostra submetida a todos os ensaios combinados (Figura 26 (h)) como era esperado, apresentou degradação mais pronunciada, com a camada de PPy fragmentada em algumas regiões. Apesar disso, a estrutura ainda mantém conectividade entre as rotas condutoras, indicando que a condutividade elétrica não foi totalmente comprometida.

4.9.2 Análise das coordenadas colorimétricas

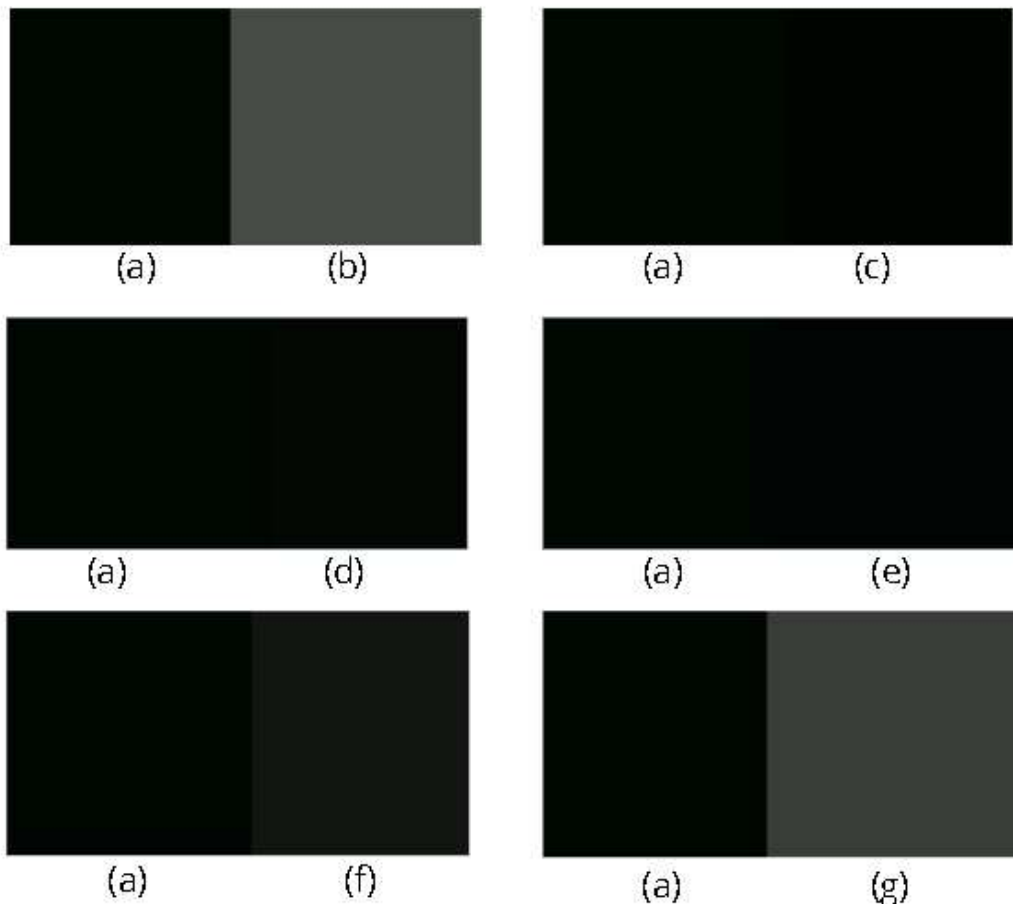
A análise colorimétrica das amostras de malha *spacer* revestida com polipirrol foi realizada pelo sistema CIE $L^*a^*b^*$, utilizando o equipamento Datacolor D500, permitindo identificar com precisão variações de tonalidade, saturação e luminosidade após a aplicação dos diferentes testes de degradação física e química. As amostras analisadas compreenderam: amostra apenas polimerizada (a); submetida a 5000 ciclos de abrasão (b); submetida a 15 ciclos de lavagem (c); resistência ao suor ácido (d); resistência ao suor alcalino (e); formação de *pilling* (f), combinação de todos os testes (g). Os dados médios obtidos no Datacolor estão apresentados na Tabela 5 e comparados visualmente por meio da figura representativa (Figura 27), gerada pelo próprio Datacolor.

Tabela 5 – Análise das coordenadas colorimétricas

Amostras	L* (média±DP)	a* (média±DP)	b* (média±DP)	ΔE (média)	Desvio
Padrão	28,41 +-1,60	0,57 +-0,09	-0,96 +-1,17	-	-
Abrasão	30,46 +-1,60	0,68 +-0,09	-0,66 +-1,17	1,48	14,36
Lavagem	32,13 +-1,60	0,79 +-0,09	-0,47 +-1,17	2,36	15,07
Suor ácido	29,08 +-1,60	0,61 +-0,09	-0,89 +-1,17	0,74	13,78
Suor alcalino	29,22 +-1,60	0,55 +-0,09	-0,77 +-1,17	0,91	13,83
Pilling	31,27 +-1,60	0,7 +-0,09	-0,54 +-1,17	1,71	14,71
Todos os ensaios	33,08 +-1,60	0,81 +-0,09	-0,33 +-1,17	3,02	15,48

Fonte: elaborado pela autora

Figura 25 – Análise visual do ΔE comparando a amostra referência (a) com as demais amostras testadas: após 5000 ciclos de abrasão (b); após 15 ciclos de lavagem (c); submetida ao suor ácido (d); submetida ao suor alcalino (e); após ensaio no Pilling Box (f), integração de todos os testes (g).



Fonte: elaborada pela autora

A amostra de referência (a) apresentou o menor valor de L^* , caracterizando o material recém-polimerizado, com máxima absorção óptica e integridade condutora. Nos grupos submetidos à abrasão (b) e à lavagem (c), observou-se aumento expressivo de L^* e ΔE superior a 1, associado ao clareamento perceptível da superfície. Essa variação visual coincide com a redução significativa de condutividade observada nos mesmos ensaios de cerca de 6 S.m^{-1} para 2 S.m^{-1} na abrasão e valores inferiores a 1 S.m^{-1} após lavagem, indicando que o desgaste mecânico e a remoção parcial do revestimento condutor do PPy.

No ensaio de suor ácido (d), as variações de L^* e ΔE foram discretas ($\Delta E < 1$), o que também se refletiu em uma pequena perda de condutividade (diferença de aproximadamente 2 S.m^{-1} em relação à amostra padrão). Esse resultado indica que, embora o meio ácido promova leve rearranjo superficial, mantém-se boa continuidade elétrica e estabilidade visual. Por outro lado, o suor alcalino (e) provocou ligeiro aumento de L^* e $\Delta E \approx 0,9$, acompanhado de redução mais perceptível na condutividade ($\approx 2,5 \text{ S.m}^{-1}$). Tal comportamento é coerente com o PPy em pH básico, que reduz tanto a absorção óptica quanto a condutividade elétrica (Saidman, 2003; Jin *et al.* 2019).

A amostra submetida ao *pilling* (f) apresentou ΔE de 1,7, refletindo um clareamento intermediário entre os efeitos de abrasão e suor. Essa alteração foi acompanhada por condutividade média de aproximadamente $1,8 \text{ S.m}^{-1}$, demonstrando que o atrito intermitente causou desgaste superficial suficiente para reduzir a densidade eletrônica da camada condutora, sem, contudo, comprometer sua funcionalidade.

A amostra (g) passou pela combinação de todos os ensaios, apresentando o maior valor de L^* (33,08) e o maior ΔE ($\approx 3,0$), evidenciando degradação óptica cumulativa. Esse resultado é compatível com a condutividade mais baixa observada ($< 1 \text{ S.m}^{-1}$), indicando perda mais acentuada do revestimento e redução significativa da conjugação eletrônica. O efeito sinérgico entre esforços mecânicos e químicos promoveu ruptura de ligações intermoleculares, remoção parcial do PPy e consequente perda simultânea de cor e condutividade.

A Figura 27 mostra comparativamente a amostra padrão e as demais submetidas a cada ensaio. Observa-se que as amostras (c), (d) e (e) mantêm coloração próxima à referência, com pequenas variações de ΔE e condutividade ainda

elevada, enquanto as amostras (b), (f) e (g) exibem clareamento mais perceptível e condutividade reduzida.

Adicionalmente, o desgaste mecânico, especialmente nos ensaios de abrasão e de formação ao *pilling*, tende a remover fisicamente parte da camada condutora, expondo o substrato têxtil e alterando tanto a refletância quanto a continuidade elétrica (Patel *et al.* 2023; Wang *et al.* 2022). A constância da tonalidade principal e a manutenção de condutividade residual mesmo após múltiplos testes indicam, porém, que a estrutura base do PPy permaneceu funcional, revelando boa estabilidade eletro-óptica do sistema desenvolvido.

4.9.3 Análise colorimétrica da alteração de cor

A análise colorimétrica comparativa foi utilizada a fim de acompanhar possíveis alterações resultantes de desgaste, lavagem e exposição a agentes químicos, especialmente em revestimentos obtidos por deposição superficial como o polipirrol. A norma ISO 105-A02 permite correlacionar a diferença visual percebida entre a amostra padrão e as amostras submetidas aos tratamentos com uma escala de cinza padronizada, fornecendo uma equivalência entre o impacto estético e a magnitude da alteração superficial. A Tabela 6 apresenta os valores de ΔE obtidos para cada ensaio, juntamente com a correspondência com o grau da escala de cinza.

Tabela 6 – Variação colorimétrica ΔE^* e equivalência ISO 105-A02

Amostras	ΔE^*	Grau ISO 105-A02	Interpretação
Suor ácido	0,67	5	Nenhuma alteração
Suor alcalino	0,83	5	Nenhuma alteração
Abrasão	2,07	3-4	Mudança perceptível
<i>Pilling</i>	2,89	4-5	Mudança muito leve
Lavagem	3,76	5	Nenhuma alteração
Todos os ensaios	4,72	3	Mudança evidente

Fonte: elaborado pela autora

A excelente estabilidade das amostras expostas ao suor ácido e alcalino (grau 5) demonstra que o polipirrol não sofre degradação química em ambientes simulados

de contato direto com a pele, o que é favorável para aplicações vestíveis. A abrasão promoveu uma mudança moderada (grau 3–4), o que pode ser explicado pela remoção da camada de PPy na superfície da malha *spacer* conferida pela polimerização oxidativa *in situ*, conforme previamente discutido na literatura.

No caso do *pilling*, a alteração presente (grau 4), sugere desprendimento superficial de partículas ou microfibrilação da estrutura que embora afete a estética, não foi suficiente para comprometer significativamente a condutividade elétrica, conforme resultados apresentados anteriormente. A lavagem, por sua vez, não apresentou alterações visuais, por mais que tenha tido a maior queda de condutividade, comparada com os demais ensaios individuais, contrariando a ideia de que a menor escala cinza equivale a maior perda de condutividade. Além disso, é importante mencionar que se trata de uma amostra tridimensional, o que pode também inferir nos resultados obtidos

A condição integrada apresentou a maior alteração (grau 3), como esperado pela ação acumulativa das solicitações mecânicas. No entanto, mesmo com ΔE elevado, o revestimento manteve condutividade em nível funcional, evidenciando que o impacto estético foi mais significativo que o elétrico.

4.10 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o intuito de verificar a significância das variações observadas na condutividade elétrica das amostras de malha *spacer* revestidas com polipirrol após os ensaios de simulação de uso, foi conduzida uma análise estatística com base nos dados obtidos ($n = 119$). As variáveis analisadas incluíram a amostra apenas polimerizada: referência (a), e as amostras submetidas aos ensaios de abrasão (b), lavagem (c), suor ácido (d), suor alcalino (e), submetido ao *pilling* (f), e a integração de todos os ensaios (g).

Inicialmente, foram obtidas as estatísticas descritivas de cada grupo experimental (Tabela 7), a fim de caracterizar a tendência central e a dispersão dos valores medidos. Observa-se que a amostra de referência apresentou a maior condutividade média ($7,11 \text{ S.m}^{-1}$), enquanto a amostra após 15 ciclos de lavagem apresentou a menor ($0,51 \text{ S.m}^{-1}$). As amostras submetidas ao suor ácido

apresentaram redução moderada ($5,74 \text{ S.m}^{-1}$), enquanto abrasão e *pilling* resultaram em pequenas variações, mantendo o comportamento condutor do material, $1,36 \text{ S.m}^{-1}$ e $1,96 \text{ S.m}^{-1}$ respectivamente. A amostra que passou por todos os ensaios (g) apresentou a menor média absoluta, com condutividade média de apenas $0,21 \text{ S.m}^{-1}$.

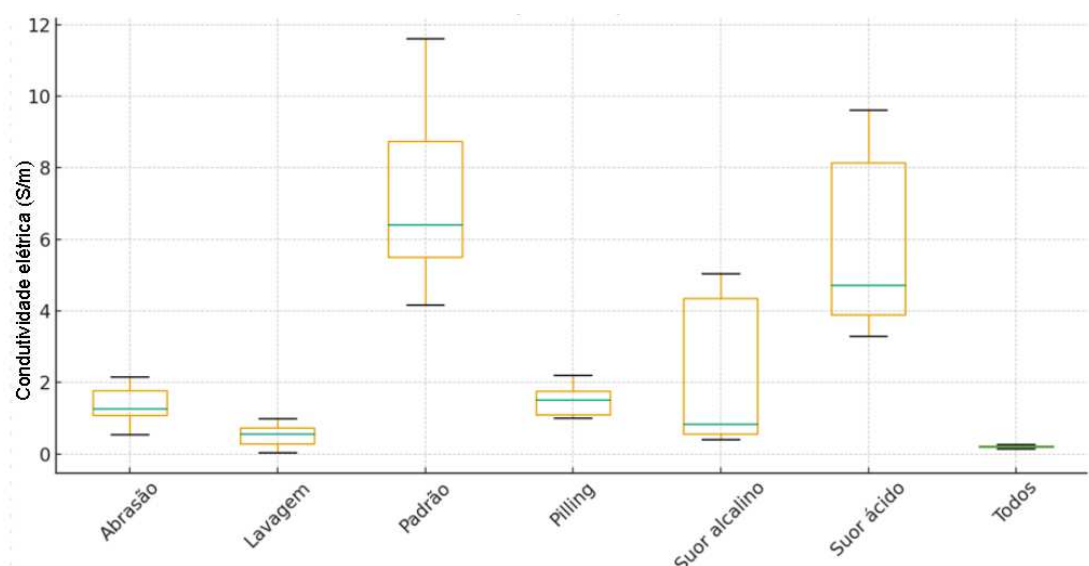
Tabela 7 – Análise descritiva da condutividade elétrica das amostras: padrão (a); abrasão (b); lavagem (c); suor ácido (d); suor alcalino (e); *pilling* (f), todos os ensaios (g).

Amostras	Média (S.m^{-1})
a	7,11 \pm 0,01
b	1,36 \pm 0,29
c	0,06 \pm 0,04
d	4,21 \pm 0,38
e	2,56 \pm 0,09
f	1,49 \pm 0,28
g	0,02 \pm 0,01

Fonte: elaborado pela autora

Foi realizado um *boxplot* (Figura 28), a fim de visualizar a distribuição dos dados de condutividade elétrica em cada condição experimental.

Figura 28 – *Boxplot* da condutividade elétrica por grupos de ensaio.



Fonte: elaborada pela autora

Nota-se que as amostras de lavagem, abrasão, *pilling* e a integração de todos os ensaios apresentam medianas mais baixas e maior dispersão, indicando maior variabilidade e perda condutora associada a esses ensaios. As amostras submetidas ao suor ácido e alcalino mantiveram valores mais concentrados, sugerindo menor impacto químico sobre o desempenho elétrico.

Para avaliar a significância das diferenças observadas, aplicou-se a análise de variância de um fator (ANOVA one-way), considerando o grupo experimental como variável independente (Tabela 8). O teste revelou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos ($F = 59,16$; $p < 0,001$), indicando que pelo menos uma das condições de ensaio afetou de forma relevante a condutividade elétrica do revestimento de polipirrol.

Em termos práticos, o valor do estatístico F reflete a razão entre a variabilidade de grupos e a variabilidade dentro dos grupos: quanto maior o valor de F, maior a probabilidade de que as diferenças observadas não sejam resultado apenas do acaso.

Tabela 8 – Resultado da ANOVA para condutividade elétrica.

Comparação	gl	SQ	QM	F	p-valor
Entre grupos	6	51,74	8,62	10,35	<0,001
Dentro dos grupos	9	7,51	0,83	-	-
Total	15	59,25	-	-	-

Fonte: elaborado pela autora

O valor de F significativo (10,35) indica que as diferenças entre as médias dos grupos são muito maiores do que a variabilidade interna de cada grupo, evidenciando que as variações observadas não ocorreram ao acaso.

A análise de variância (ANOVA *one-way*) tem como objetivo comparar as médias de mais de dois grupos para verificar se existe diferença estatisticamente significativa entre eles. Na Tabela 9, são apresentados os resultados obtidos a partir das medições de condutividade elétrica nas diferentes condições experimentais.

O termo “Entre grupos” representa a variação explicada pelos tratamentos, ou seja, as diferenças entre as médias das amostras submetidas a distintos ensaios

(amostra referência, abrasão, lavagem, suor ácido, suor alcalino e submetido ao *pilling*). Já o termo “Dentro dos grupos” corresponde à variação residual, relacionada às diferenças individuais entre amostras do mesmo grupo (ou ao erro experimental).

O valor de $F = 10,35$ indica a razão entre essas duas fontes de variação (entre e dentro dos grupos). O p -valor $< 0,001$ confirma essa interpretação, mostrando que há diferença estatisticamente significativa entre pelo menos duas das condições de ensaio, com nível de confiança superior a 99,9%.

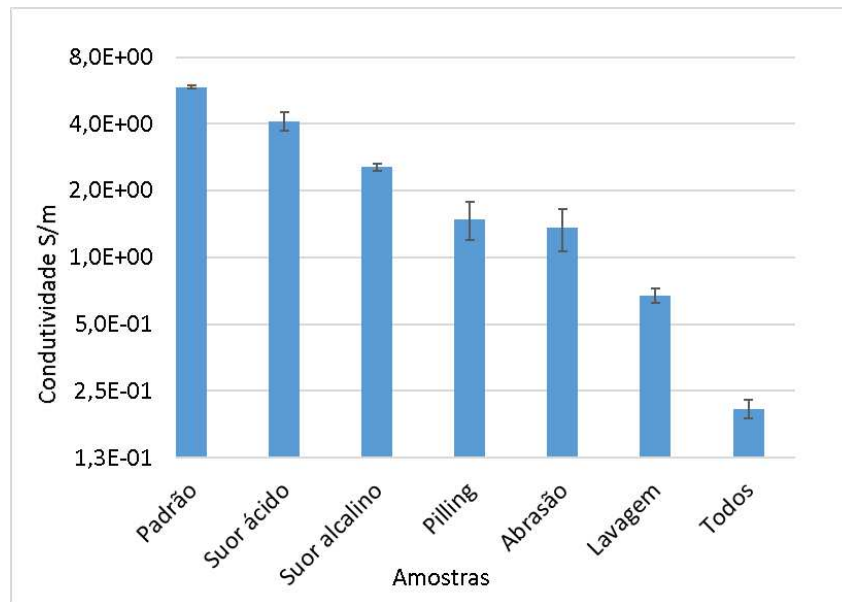
Contudo, a ANOVA apenas indica que existe diferença entre os grupos, sem especificar onde essas diferenças ocorrem. Por isso, aplicou-se o teste post hoc de Tukey HSD, que realiza comparações múltiplas entre todas as combinações de grupos para identificar quais pares apresentaram diferenças significativas (Tabela 9, Figura 29).

Tabela 9 – Resultados do teste post hoc de *Tukey HSD*.

Comparação entre amostras	Diferença de médias	p-valor	Significância
Referência <i>versus</i> suor ácido	1,191	0,865	Não
Referência <i>versus</i> suor alcalino	3,061	0,270	Não
Referência <i>versus pilling</i>	3,911	0,060	Não
Referência <i>versus</i> lavagem	4,852	0,014	Sim
Referência <i>versus</i> abrasão	4,136	0,035	Sim
Referência <i>versus</i> todos os ensaios	5,054	0,009	Sim

Fonte: elaborado pela autora

Figura 29 – Condutividade elétrica com desvio padrão das amostras.



Fonte: elaborada pela autora

Os resultados do teste (Tabela 9) mostraram que as diferenças estatísticas mais expressivas ocorreram entre o grupo de referência e os grupos de lavagem, suor ácido, suor alcalino e todos os tratamentos combinados, confirmando que as condições químicas foram as principais responsáveis pela redução da condutividade elétrica. As comparações entre referência *versus* abrasão e referência *versus pilling* não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$), o que indica que os ensaios mecânicos não afetaram de forma relevante o desempenho elétrico do revestimento de polipirrol.

O gráfico da Figura 29 reforça visualmente os resultados do teste de *Tukey*, evidenciando a expressiva redução de condutividade nas amostras submetidas aos ensaios de lavagem (c), que apresentou a menor média, resultado da possível remoção parcial do revestimento condutor e pH sobre o polipirrol. As condições de suor ácido e suor alcalino causaram menor degradação as amostras mantendo uma excelente condutividade elétrica, atribuída à oxidação e desprotonação das cadeias poliméricas.

Em contrapartida, os ensaios mecânicos (abrasão e *pilling*) alteraram significativamente a condutividade, sugerindo baixa estabilidade estrutural e aderência do PPy às fibras de poliéster, porém a condutividade apresentada por eles ainda se mostra significativa.

5 CONCLUSÃO

A partir deste trabalho, foi possível avaliar o comportamento elétrico e estrutural de uma malha *spacer* revestida com polipirrol frente a diferentes condições de uso, simulando situações reais de desgaste.

O processo de polimerização *in situ* mostrou-se eficiente, evidenciado pela alteração da coloração das amostras e pela presença das bandas características do PPy nos espectros de FTIR, confirmando a adesão do polímero à superfície das fibras. As amostras polimerizadas apresentaram condutividade elétrica dentro da faixa típica para o PPy, comprovando a eficiência do revestimento e a efetiva funcionalização da malha.

A análise dos resultados de condutividade elétrica demonstrou que os diferentes ensaios de uso afetaram de maneira distinta o desempenho do material. Dentre as condições avaliadas, o ensaio de lavagem foi o que mais afetou a condutividade elétrica, em virtude da ação combinada da temperatura, do detergente e da agitação mecânica, que favoreceram o desprendimento parcial da camada polimérica. O ensaio de abrasão também provocou redução perceptível na condutividade, associada ao desgaste superficial. O ensaio de *pilling* apresentou um comportamento semelhante ao de abrasão, porém manteve uma melhor condutividade. Por outro lado, os ensaios de suor destacaram-se por manter os maiores valores de condutividade entre todas as condições testadas, evidenciando a estabilidade química e a forte ancoragem do PPy às fibras. Dessa forma, a ordem decrescente de influência sobre a degradação da condutividade nos ensaios foi: lavagem > abrasão > *pilling* > suor, confirmando que, embora alguns testes causem leve perda de desempenho elétrico, o material manteve excelente estabilidade e potencial para aplicação em sensores têxteis e dispositivos vestíveis.

O comportamento piezoresistivo das amostras confirmou a capacidade do material em responder a estímulos mecânicos, apresentando variações reproduzíveis de resistência elétrica sob compressão, o que demonstra sua viabilidade como sensor flexível. Assim, o revestimento de malhas *spacer* com PPy mostrou-se promissor para o desenvolvimento de têxteis inteligentes, unindo conforto, flexibilidade e funcionalidade elétrica, além de indicar perspectivas relevantes para futuras aplicações em dispositivos eletrônicos vestíveis.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Recomenda-se a realização de estudos voltados à otimização da fixação do polímero condutor ao substrato têxtil, por meio da investigação de diferentes condições de polimerização in situ, tipos de dopantes e possíveis tratamentos pós-revestimento. Essas abordagens visam aumentar a adesão e a estabilidade do revestimento de PPy frente a ciclos prolongados de uso, como lavagem, abrasão e deformações mecânicas repetidas, contribuindo para a manutenção da condutividade elétrica. Além disso, tais estudos são fundamentais para viabilizar a integração segura e eficiente do material em sistemas eletrônicos vestíveis, garantindo desempenho eletromecânico confiável em aplicações práticas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, T. P.; BORELLI, C.; GIACOMINI, R. C. **Tecido Jacquard sensível ao toque para interfaces residenciais**: um estudo técnico com enfoque multidisciplinar. *Caderno Pedagógico*, v. 22, n. 7, p. e16710, 28 maio 2025.
- AMORIM, R. G. G. de. **Condução elétrica nos sólidos: abordagem clássica e moderna**. FIRA, 2014. Disponível em: https://fira.edu.br/revista/2014_vol1_num2_pag1.pdf. Acesso em: 16 out. 2025.
- BARLIAN, A. A. et al. **Semiconductor piezoresistance for microsystems**. *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 3, p. 513-552, 2009.
- DEJENE, B. K.; GUDAYU, A. D. **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.
- DU, K.; LIN, R.; YIN, L.; HO, J. S.; WANG, J.; LIM, C. **Electronic textiles for energy, sensing, and communication**. *iScience*, v. 25, n. 5, p. 104174, 2022. DOI: 10.1016/j.isci.2022.104174.
- DU, K. et al. **Conductive polymers for wearable electronics**. *Advanced Materials*, v. 37, n. 13, p. 2302415, 2025. DOI: 10.1002/adma.202302415.
- DOU, Lu; ZENG, Zhen; CHENG, Deshan; LI, Shengyu; KE, Wei; CAI, Guangming. **Weft-Knitted Spacer Fabric for Highly Stretchable–Compressible Strain Sensor, Supercapacitor, and Joule Heater**. *Nanomaterials*, v. 12, n. 20, p. 3684, 2022. DOI: 10.3390/nano12203684
- EGHAN, B. et al. **Systematic review of conductive inks for e-textiles**: formulation, printing methods, challenges and opportunities. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, v. 20, p. 1-21, 2025. DOI: 10.1177/24723444241303970.
- FERREIRA, A. J. S.; FERREIRA, F. B. N.; OLIVEIRA, F. R. **Têxteis inteligentes – uma breve revisão da literatura**. *Revista de Design, Inovação e Gestão Estratégica*, v. 5, n. 1, p. 1-22, abr. 2014.
- FERREIRA, F. B. N. **Desenvolvimento de têxteis condutores via polimerização *in situ* de polipirrol**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Têxtil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2024.
- FREITAS, B. B. et al. **Materiais condutores e isolantes**: investigação de suas propriedades elétricas. *Create – Revista das Engenharias*, v. 0, n. 0, 2024.
- GETHS, B. R. **Análise da condutividade de malhas spacer revestidas com polipirrol**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Têxtil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2023.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física – Eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HE, Y. et al. **Interpreting compression resistance and resilience of spacer fabrics knitted with different polymeric monofilaments**. *Textile Research Journal*, v. 94, n. 5, p. 618-633, 2024. DOI: 10.1177/00405175241241818.

HORROCKS, A. R.; ANAND, S. C. **Handbook of Technical Textiles: Technical Textiles Processes**. 2. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016.

IDUMAH, C. I. **Design, fabrication, characterization and properties of metallic and conductive smart polymeric textiles for multifunctional applications**. *Nano-Structures & Nano-Objects*, v. 35, p. 100982, 2023.

KAYNAK, A.; MATHUR, A.; CASSIDY, P. **Electrical stability of polypyrrole-coated textiles under thermal aging**. *Polymer Degradation and Stability*, v. 186, p. 109531, 2021. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109531.

LE, H. R. **Conductive polymers and their optical properties**. *Journal of Materials Science and Engineering*, v. 6, n. 3, p. 112–120, 2017.

LEE, Ji-Eun; KIM, Sang-Un; KIM, Joo-Yong. **Fabrication of a Capacitive 3D Spacer Fabric Pressure Sensor with a Dielectric Constant Change for High Sensitivity**. *Sensors*, v. 24, n. 11, p. 3395, 2024.

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

LIU, X.; ZHANG, Y.; WANG, Y. et al. **Durable metallized liquid-crystal polymer fibers enable robust conductive textiles**. *Advanced Materials*, v. 37, n. 13, p. 2302415, 2025.

LIU, Y.; ZHANG, H.; WU, D.; HU, X. **Development and characterization of polypyrrole-coated conductive textiles with enhanced flexibility and conductivity**. *Textile Research Journal*, v. 92, n. 10–12, p. 1984–1997, 2022.

LOTZ, K.; SU, C.; ZHANG, Y.; LIU, Y. **Structural analysis of three-dimensional mesh fabric by micro X-ray computed tomography**. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, v. 14, p. 1-9, 2019.

LUO, J.; CHEN, S.; SHI, D. **Research on the performance of polypyrrole-coated conductive fabrics prepared from different base materials**. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, v. 31, n. 1, p. 35-41, 2023.

LUO, J.; CHEN, S.; SHI, D.-W. **Study of Electrical and Mechanical Properties of Polypyrrole-Coated Three-Dimensional Spacer Fabric**. *AATCC Journal of Research*, v. 11, n. 3, p. 183–193, 2024.

LUO, L. et al. **Investigation of the tribological properties of 3D spacer fabrics coated with polypyrrole for wearable applications**. *Journal of Industrial Textiles*, v. 54, n. 4, p. 1-18, 2024.

MACHADO, A. C. **Revestimento de malhas spacer com polipirrol via polimerização *in situ***. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Têxtil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2024.

MAESTRI, G. **Efeito piezoelétrico em têxteis inteligentes utilizando malhas por trama. Dissertação** (Mestrado em Engenharia Têxtil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2022.

MAESTRI, G. et al. **Recent advances in piezoelectric textile materials: a brief literature review**. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, v. 18, p. 15589250231151242, 2023.

MAITY, S. **Introduction to functional and technical textiles**. In: **Functional and Technical Textiles**. Elsevier, 2023. p. 1–20.

OJSTRŠEK, A.; JUG, L.; PLOHL, O. **A review of electro conductive textiles utilizing the dip-coating technique: their functionality, durability and sustainability**. *Polymers*, v. 14, n. 21, p. 4713, 2022.

PARADISO, R.; CALDANI, L.; PACELLI, M. **Knitted electronic textiles**. In: SAZONOV, E.; NEUMAN, M. R. (Org.). **Wearable Sensors**. Oxford: Academic Press, 2014. p. 153-174.

PATEL, A.; KIM, S.; LEE, J. **Study on the properties of polypyrrole (PPy)-coated 3D spacer conductive fabric**. *Frontiers in Materials*, v. 10, p. 119-128, 2023.

SERRANO-CLAUMARCHIRANT, J.; ORTEGA, A.; LÓPEZ, P. **Electrochemical deposition of conductive polymers on textiles for sensor applications**. *Electrochimica Acta*, v. 451, p. 142189, 2023.

SKYRME, T. **E-textiles and smart clothing markets 2023–2033: technologies, players and applications**. Cambridge: IDTechEx, 2023.

TSEGHAI, G. B. et al. **Integration of conductive materials with textile structures: an overview**. *Sensors*, v. 20, n. 23, p. 6910, 2020.

WANG, Xiujuan; GAO, Xiaoyu; WANG, Yu; NIU, Xin; WANG, Tanyu; LIU, Yuanjun; QI, Fangxi; JIANG, Yaming; LIU, Hao. **Development of High-Sensitivity Piezoresistive Sensors Based on Highly Breathable Spacer Fabric with TPU/PPy/PDA Coating**. *Polymers*, v. 14, n. 5, p. 859, 2022

WANG, Q.; LI, Y.; WU, T. **Mechanical stability and electrical retention of conductive polymer films on textile substrates**. *Synthetic Metals*, v. 290, p. 117192, 2022.

WANG, Y.; ZHANG, L.; LI, Y. **Recent progress of knitted spacer fabrics for wearable and multifunctional applications.** Discover Textile, v. 2, n. 1, p. 1-16, 2024.

XIE, Zeyue; VENTURA, Heura; ARDANUY, Mònica. **A Review of the Electrical Conductivity Test Methods for Conductive Fabrics.** Textiles, v. 4, n. 3, p. 284–308, 2024. DOI: 10.3390/textiles4030017.

YU, Z.; LI, J.; ZHANG, K.; LIU, H. **Spacer fabric as a substitute for neoprene in flexible cushioning applications.** Journal of Textile Engineering, v. 68, n. 4, p. 201-210, 2022.

ZHANG, H.; LI, Z.; DAS, O. **Polypyrrole-modified multi-functional coatings for improved electro-conductive, hydrophilic and flame-retardant properties of polyamide 66 textiles.** Journal of Coatings Technology and Research, v. 20, n. 4, p. 1223-1234, 2023.

ZHANG, J. et al. **Preparation of *in situ* polymerized polypyrrole-modified braided cord and its electrical conductivity investigation under varied mechanical conditions.** e-Polymers, v. 25, n. 1, 2025.

ZHANG, L.; HUANG, X.; WU, J. **Preparation of conductive cellulose coated with conductive polymer and its application in the detection of pH and characteristic substances in sweat.** International Journal of Molecular Sciences, v. 25, n. 12, p. 6393, 2024.

ZHANG, Y.; LI, H.; CHEN, X. **Optical and electronic properties of polypyrrole thin films: influence of doping states.** Polymer Degradation and Stability, v. 183, p. 109–118, 2021