



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

Lissa Machado Siqueira

Malha *spacer* e polipirrol: uma abordagem para o desenvolvimento de têxteis
inteligentes condutores

Blumenau
2024

Lissa Machado Siqueira

Malha *spacer* e polipirrol: uma abordagem para o desenvolvimento de têxteis
inteligentes condutores

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

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

Blumenau
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Machado Siqueira, Lissa
Malha spacer e polipirrol: uma abordagem para o desenvolvimento de têxteis inteligentes condutores / Lissa Machado Siqueira ; orientadora, Fernanda Steffens, 2024.
55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Piezoresistividade. 3. Poliéster. 4. Solidez à lavagem. I. Steffens, Fernanda. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Têxtil. III. Título.

Lissa Machado Siqueira

Malha spacer e polipirrol: uma abordagem para o desenvolvimento de têxteis inteligentes condutores

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

Blumenau, 06 de dezembro de 2024.



Documento assinado digitalmente
Grazyella Cristina Oliveira de Aguiar
Data: 09/12/2024 11:16:37-0300
CPF: ***.439.299-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. (a) Grazyella Cristina Oliveira de Aguiar, Dr.(a).

Coordenação do Curso

UFSC - Blumenau

Banca examinadora



Documento assinado digitalmente
Fernanda Steffens
Data: 10/12/2024 10:05:55-0300
CPF: ***.009.749-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

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

Orientador(a)

UFSC - Blumenau



Documento assinado digitalmente
Claudia Merlini
Data: 06/12/2024 18:02:15-0300
CPF: ***.787.580-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof.(a) Claudia Merlini, Dr.(a)

UFSC - Blumenau



Documento assinado digitalmente
Miguel Angelo Granato
Data: 06/12/2024 22:39:57-0300
CPF: ***.641.507-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Miguel Angelo Granato, Dr.

UFSC - Blumenau

Blumenau, 2024.

*Dedico este trabalho à minha família,
a quem agradeço as bases que deram
para me tornar a pessoa que sou hoje.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina e ao corpo docente do curso de Engenharia têxtil, por proporcionar um ambiente e ensino de excelência para a minha formação acadêmica.

Aos meus queridos pais, Érica e Ronaldo, por me darem todo o suporte, carinho e atenção durante toda a minha vida e principalmente durante a minha graduação. Sem vocês nada disso seria possível.

À minha irmã e melhor amiga, Nataly, por estar comigo em todos os momentos, os felizes e os difíceis, sempre me dando apoio e não deixando que eu desistisse dos meus sonhos. Amo você, irmã.

À minha orientadora Prof^a Fernanda Steffens, pelo suporte, incentivo e conselhos que levarei para a vida.

À Andressa por ser meu braço direito, ter me ensinado tudo o que sei de laboratório e ter sido suporte nessa fase final da graduação.

À Mariane e Nicole por todo suporte, carinho, puxões de orelha, risadas e companheirismo nesses últimos anos de graduação. Obrigada por estarem aqui.

À Quesli, Amanda, Stefani e Cecili por me acompanharem durante essa jornada acadêmica desde o começo e pela nossa amizade.

Ao Joziel, Daniel e Lucas pelo suporte na realização dos testes para esse trabalho.

A todos que estiveram comigo e contribuíram de alguma forma, muito obrigada.

“A persistência é o caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

O desenvolvimento de têxteis condutores é fundamental para a criação de *e-textiles* e suas diversas aplicações. Diante disso, o objetivo deste estudo foi desenvolver malhas *spacer* por trama com comportamento condutor de eletricidade a partir da polimerização *in situ* de polipirrol na presença da malha supracitada e simular as suas condições de usabilidade. Utilizou-se a condição experimental de 0,050 mol/L de polipirrol durante o tempo de 60 min, a qual apresentou uma condutividade elétrica igual a $1,4229 \times 10^{-4}$ S/cm. Os ensaios de resistência à tração demonstraram que as amostras antes e após o revestimento com polipirrol, em ambas as direções (coluna e fileira), apresentam praticamente a mesma tensão de ruptura, entretanto, com menor alongamento na direção da coluna após o revestimento. O ensaio de abrasão demonstrou que a amostra não teve grande perda de massa após 10.000 ciclos e a condutividade elétrica se manteve na faixa de $6,7314 \times 10^{-5}$ S/cm. Após 15, 20 e 25 ciclos de lavagem, a condutividade reduziu e se manteve estável, sendo observado os valores de $1,4653 \times 10^{-5}$ S/cm, $4,2090 \times 10^{-6}$ S/cm e $3,1837 \times 10^{-6}$ S/cm, respectivamente. A análise do MEV, realizada após as lavagens, demonstrou a redução na quantidade de PPy aderido à superfície conforme o aumento dos ciclos de lavagem. O ensaio de solidez ao suor ácido e alcalino demonstrou que as amostras não perderam condutividade, se mantendo na ordem decimal de 10^{-4} S/cm. O ensaio eletromecânico foi realizado com as amostras após lavagem nas tensões de 250, 500 e 1000 KPa e confirmou o comportamento piezoresistivo das amostras revestidas com polipirrol. Esses resultados demonstram que a malha *spacer* revestida com polipirrol é promissora para o desenvolvimento de *e-textiles*.

Palavras-chave: Piezoresistividade; Poliéster; Solidez à lavagem

ABSTRACT

The development of conductive textiles is essential for the creation of e-textiles and their various applications. The objective of this study was to develop a weft-knitted spacer fabric with electrical conductivity through the in situ polymerization of polypyrrole in spacer fabric and to simulate its usability under different conditions. The experimental condition of 0.050 mol/L of polypyrrole for 60 minutes was used, resulting in an electrical conductivity of 1.4229×10^{-4} S/cm. The tensile strength test demonstrated that the sample coated with polypyrrole exhibited greater mechanical resistance in both directions (wale and course) compared to the raw fabric. The abrasion test showed no significant mass loss after 10,000 cycles, with the electrical conductivity remaining at 6.7314×10^{-5} S/cm. After 15, 20, and 25 washing cycles, the conductivity decreased but stabilized, with values of 1.4653×10^{-5} S/cm, 4.2090×10^{-6} S/cm, and 3.1837×10^{-6} S/cm, respectively. Scanning electron microscope (SEM) analysis performed after washing showed a reduction in the amount of polypyrrole adhered to the surface as the number of wash cycles increased. The acid and alkali perspiration fastness tests indicated that the samples did not lose conductivity, maintaining values in the order of 10^{-4} S/cm. The electromechanical test, conducted with the samples after washing at 250, 500, and 1000 KPa, confirmed the piezoresistive behavior of the polypyrrole-coated samples. These results demonstrate that the weft-knitted spacer fabric coated with polypyrrole shows great potential for the development of e-textiles.

Keywords: Piezoresistivity; Polyester; Wash fastness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da malha <i>spacer</i> por trama produzida em tear retilíneo a) estrutura da malha; b) fio de ligação; c) camada externa e d) fio de ligação entrelaçado entre as camadas externas	20
Figura 2 – Diagrama para auxiliar na distinção entre tecnologia wearable e têxteis inteligentes	26
Figura 3 – Classificação de <i>e-textile</i>	28
Figura 4 – Metodologia experimental	32
Figura 5 – Esquema ilustrativo do processo de polimerização <i>in situ</i> do pirrol em malha <i>spacer</i>	34
Figura 6 – Amostra a) sem revestimento, b) após revestimento	38
Figura 7 – Curva tensão x deformação da malha <i>spacer</i> antes da funcionalização..	39
Figura 8 – Curva tensão x deformação da malha <i>spacer</i> revestida	39
Figura 9 – Amostra sem revestimento (padrão): a) antes, b) após 10.000 ciclos de abrasão	40
Figura 10 – Amostras revestidas com polipirrol: a) antes da abrasão, b) após 10.000 ciclos de abrasão	41
Figura 11 – Gráfico de perda de massa antes e após abrasão.....	41
Figura 12 – Gráfico da condutividade elétrica antes e após ciclos de abrasão	42
Figura 13 – Perda de massa antes e após ciclos de lavagem	43
Figura 14 – Condutividade elétrica antes e após ciclos de lavagem	44
Figura 15 – Micrografias em vista longitudinal, transversal e dos fios de ligação: a) antes da lavagem, b) após 15 x c) após 20 x e d) após 25 x, com aumento de 100 x, 35 x e 500 x.....	45
Figura 16 – Condutividade antes e após solidez ao suor ácido e alcalino	46
Figura 17 – Resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % (pontos azuis, eixo direito) e tensão de compressão em 250 KPa (linha laranja, eixo esquerdo) em função do tempo de ensaio: a) antes da lavagem, b) após 15x c) após 20x e d) após 25x.....	48
Figura 18 – Resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % (pontos azuis, eixo direito) e tensão de compressão em 500 KPa (linha laranja, eixo esquerdo) em função do tempo de ensaio: a) antes da lavagem, b) após 15x c) após 20x e d) após 25x.....	49

Figura 19 – Resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % (pontos azuis, eixo direito) e tensão de compressão em 1000 KPa (linha laranja, eixo esquerdo) em função do tempo de ensaio: a) antes da lavagem, b) após 15x c) após 20x e d) após 25x.....50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação entre <i>wearables</i> e <i>e-textiles</i>	27
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FeCl ₃ .6H ₂ O	Cloreto de ferro hexahidratado
LABMAM	Laboratório de meio ambiente
LABTEC	Laboratório de tecidos e malhas
LCME	Laboratório central de microscopia eletrônica
LEM	Laboratório de ensaios mecânicos
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
PANI	Polianilina
PEDOT:PSS	Poli(3,4-etilenodioxitiofeno) poliestireno sulfonato
PES	Poliéster
POLICOM	Laboratório de polímeros e compósitos
PPy	Polipirrol
PUE	Elastano

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Conductividade elétrica
Ω	Ohm
ρ	Resistividade elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	MALHAS <i>SPACER</i> POR TRAMA	19
2.2	PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS MATERIAIS.....	20
2.3	TÊXTEIS INTELIGENTES	23
2.3.1	Têxteis condutores	23
2.3.2	E-textiles e wearables	25
2.4	POLÍMEROS INTRINSICAMENTE CONDUTORES.....	29
3	METODOLOGIA	32
3.1	MATERIAIS.....	32
3.2	MÉTODOS	33
3.2.1	Obtenção da malha <i>spacer</i> revestida com polipirrol	33
3.2.2	Caracterização da malha <i>spacer</i> funcionalizada	34
3.2.2.1	<i>Resistência à tração</i>	34
3.2.2.2	<i>Resistência à abrasão</i>	34
3.2.2.3	<i>Resistência à lavagem</i>	35
3.2.2.4	<i>Resistência ao suor</i>	35
3.2.2.5	<i>Condutividade elétrica pelo método de 4 pontas</i>	35
3.2.2.6	<i>Ensaio eletromecânico</i>	36
4	RESULTADOS	38
4.1	REVESTIMENTO DA MALHA <i>SPACER</i> COM POLIPIRROL	38
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA MALHA <i>SPACER</i> REVESTIDA	38
4.2.1	Resistência à tração	38
4.2.2	Condutividade elétrica após abrasão	40
4.2.3	Condutividade elétrica após ciclos de lavagens	43
4.2.4	Análise morfológica das amostras após ciclos de lavagens	44
4.2.5	Condutividade elétrica após suor ácido e alcalino	45
4.2.6	Eletromecânico	46
5	CONCLUSÃO	51

6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente por novos materiais têxteis para serem utilizados nas mais diversas indústrias, para uma variedade de aplicações, tem sido o principal agente impulsionador do avanço dos estudos científicos e do crescimento acelerado do campo dos têxteis inteligentes. Projeções indicam que o mercado global de têxteis inteligentes deve expandir-se a uma taxa anual composta de 25 % entre 2021 e 2031, podendo ultrapassar 23,82 bilhões de dólares até o final desse período (Júnior *et al.*, 2022).

Para integrar funcionalidades inteligentes em produtos têxteis, as abordagens geralmente envolvem explorar propriedades intrínsecas ao material, como a condutividade elétrica, a incorporação de circuitos ao tecido já finalizado ou o uso de métodos híbridos que combinam componentes eletrônicos com a estrutura têxtil. Essa integração de funcionalidades permite criar produtos que unem eficiência tecnológica e versatilidade no *design* (Júnior *et al.*, 2022).

Como resultado dos recentes avanços na ciência dos materiais, os têxteis condutores são materiais que possuem a capacidade de conduzir sinais elétricos e funcionar como circuitos flexíveis. Essa inovação é fundamental para a criação dos chamados tecidos eletrônicos, ou *e-textiles*, que integram funcionalidades como aquecimento, sensoriamento, iluminação ou transmissão de dados, para uma gama versátil de aplicações, incluindo militar, automotivo, saúde, aeroespacial, esportivo e vestuário *fitness*, proteção, ambiente, petróleo e gás (Idumah, 2023).

Existem diferentes maneiras de se obter condutividade elétrica em um material têxtil. Uma delas é a partir do revestimento do substrato têxtil com um polímero condutor. Essa abordagem apresenta a vantagem de ser compatível com diversos tipos de fibras, mantendo, simultaneamente, as propriedades originais do tecido, como sua densidade, sensação ao toque e o mais importante, sua flexibilidade (Stoppa; Chiolerio, 2014).

Dentre os diversos polímeros intrinsecamente condutores, o polipirrol destaca-se como um polímero condutor promissor devido à sua estabilidade ambiental, facilidade de síntese e à possibilidade de ajuste da condutividade elétrica por meio do controle do grau de dopagem. Além disso, a deposição de polipirrol sobre superfícies de fibras como lã, algodão, poliéster e poliamida permite combinar a leveza,

resistência à tração e elevada área superficial dessas fibras com as propriedades elétricas, óticas e magnéticas dos polímeros condutores (Merlini *et al.*, 2012).

Entre os materiais têxteis utilizados como base para a funcionalização/revestimento com polímeros condutores, as malhas *spacer* se destacam por suas características únicas. Essas estruturas possuem características que as tornam ideais para diversas aplicações técnicas. Elas apresentam baixa densidade, uma ampla gama de espessuras que varia entre 2 e 65 mm, além de conforto, propriedades elásticas, compressivas e permeáveis ajustáveis. Essas propriedades, inerentes à estrutura dos *spacer*, tornam-nos uma escolha ideal para o desenvolvimento de materiais avançados, sem a necessidade de espuma, borracha, látex ou técnicas de laminação (Dejene; Gudayu, 2024).

Portanto, conciliar polímeros condutores juntamente com malhas *spacer*, apresenta uma oportunidade para o desenvolvimento de materiais inteligentes que poderão ser usados para diversas aplicações. Além disso, se faz necessário compreender o comportamento frente a usabilidade real desses materiais por meio de ensaios de tração e abrasão, solidez à lavagem e aos diferentes tipos de suor.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados o objetivo geral e os específicos para a execução deste projeto final de curso.

1.1.1 Objetivo Geral

Revestir a malha *spacer* por trama com polipirrol para se tornar condutora a fim de se obter um comportamento piezoresistivo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Investigar se as propriedades mecânicas de tração são alteradas após a polimerização do polipirrol na superfície da malha;
- Verificar a condutividade elétrica das amostras polimerizadas após a solidez a abrasão pela técnica Martindale utilizando diferentes ciclos;

- Avaliar a morfologia e a condutividade elétrica das amostras polimerizadas depois de repetidos ciclos de lavagem e após o ensaio de solidez ao suor ácido e alcalino;
- Analisar o comportamento eletromecânica das amostras de malha *spacer* revestidas com polipirrol.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão apresentados os conceitos da fundamentação teórica utilizados para obter a compreensão do tema abordado neste TCC. Inicia-se com uma abordagem sobre as malhas *spacer* por trama e as propriedades elétricas dos materiais; em seguida, apresenta-se os têxteis inteligentes e condutores, discutindo sobre as diferenças entre os termos “*e-textile*” e “*wearable*”. Por fim, discute-se sobre as fibras poliméricas condutoras e estudos já realizados.

2.1 MALHAS *SPACER* POR TRAMA

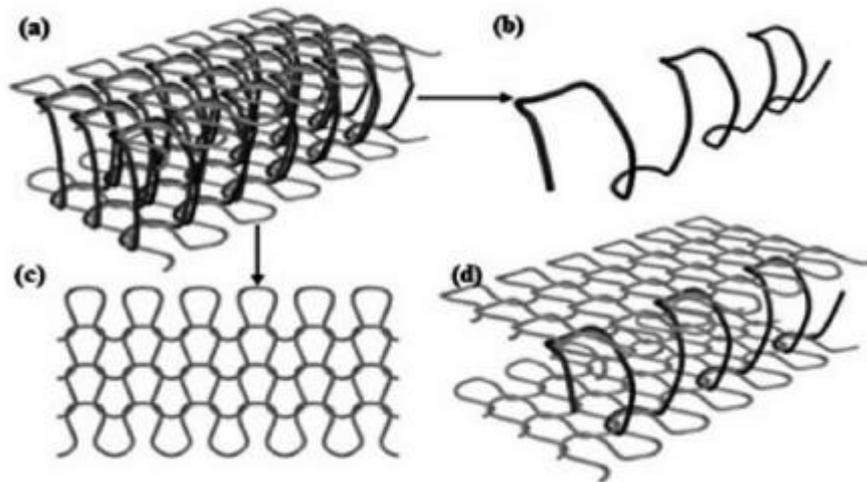
Estrutura *spacer* consiste em um têxtil tridimensional composta por duas camadas externas unidas por fios de ligação perpendiculares às camadas, sendo esse fio comumente um monofilamento. Sua obtenção pode se dar a partir da tecnologia de tecelagem e da tecnologia de malharia, sendo a segunda a mais utilizada. Quando a estrutura é desenvolvida a partir da tecnologia de malharia, é possível obtê-la tanto a partir da malharia por urdume como por trama. A malha *spacer* por urdume é produzida em teares Raschel com duas barras de agulha, e é a mais conhecida dentre as malhas *spacer*. Já a produzida pela tecnologia de malharia por trama é obtida a partir de teares circulares jersey de duplafrontura e em teares retilíneos, também duplafrontura (Yip; Ng, 2008).

Segundo Chen *et al.*, 2018, as estruturas *spacer* são muito estudadas principalmente pelo seu bom desempenho de compressão, absorção e comportamento ao impacto. Além disso, devido à sua estrutura tridimensional, os *spacers* apresentam boas propriedades de resiliência, além de uma excelente capacidade de distribuir pressão e elevada permeabilidade ao ar. Essa estrutura também é eficiente no controle de calor, umidade e na transferência de vapor de água. Essas características tornam as estruturas *spacers* uma alternativa interessante para espumas convencionais usadas em assentos, sofás e colchões, além de serem indicados para produtos de amortecimento destinados à proteção corporal (Asayesh; Amini, 2021).

As malhas *spacer* por trama permitem maior controle sobre os parâmetros de *design*, ou seja, relacionados a estrutura da malha, enquanto as por urdume costumam utilizar monofilamentos mais rígidos e camadas de maior espessura, proporcionando elevada resistência à compressão. Logo, a estrutura das camadas

externas nas malhas por urdume é mais rígida, enquanto a malha por trama é mais flexível e confortável, tornando-a ideal para roupas personalizadas e aplicações que exigem maciez (Dejene; Gudayu, 2024). A Figura 1 ilustra uma estrutura de malha *spacer* por trama.

Figura 1 – Estrutura da malha *spacer* por trama produzida em tear retilíneo a) estrutura da malha; b) fio de ligação; c) camada externa e d) fio de ligação entrelaçado entre as camadas externas



Fonte: Dejene; Gudayu, 2024.

Segundo Dejene; Gudayu, (2024) a flexibilidade no uso de diferentes tipos de fios, densidades, espessuras e estruturas nas malhas *spacer* por trama permite ajustes detalhados nas propriedades físicas do tecido. Essa versatilidade em características físicas, térmicas e mecânicas torna as malhas *spacer* amplamente aplicáveis em diversas áreas, incluindo produtos médicos e esportivos.

2.2 PROPRIEDADES ELÉTRICAS DOS MATERIAIS

Malhas não apresentam comportamento condutor de eletricidade na sua forma original. O mesmo sucede para as malhas *spacer* por trama. Isso ocorre porque são compostas predominantemente por polímeros não condutores, como poliéster e poliamida. Essa limitação torna necessário o uso de estratégias de funcionalização, como a deposição de polímeros condutores ou tratamentos químicos específicos para introduzir condutividade elétrica.

As propriedades elétricas dos materiais desempenham um papel crucial em uma variedade de aplicações. Pode-se afirmar que dois grupos principais de materiais se destacam por exibirem essas propriedades: os metais e os polímeros. Os metais são conhecidos por sua elevada condutividade elétrica, devido à presença de elétrons livres que podem se mover facilmente sob a influência de um campo elétrico aplicado. Por outro lado, os polímeros, mais especificamente os polímeros intrinsecamente condutores, podem exibir propriedades elétricas modificadas quando dopados ou modificados quimicamente, tornando-os condutores em certas circunstâncias (Hummel, 2001).

A condutividade elétrica (σ) é uma propriedade importante que descreve a capacidade de um material em permitir o fluxo de corrente elétrica. Pode-se classificar os materiais a partir de sua condutividade como: condutores, com condutividade superior a 10^4S/m ; semicondutores, com condutividade entre 10^{-10}S/m e 10^4S/m ; e isolantes, com condutividade menor que 10^{-10}S/m . Matematicamente, a condutividade de um material é dada pela Equação 1 (Halliday, Resnick e Walker, 2012). A condutividade dos polímeros totalmente dopados diminui com a redução da temperatura, em contraste com a condutividade dos metais convencionais que aumenta com a diminuição da temperatura (Le; Kim; Yoon, 2017).

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

Onde:

σ = condutividade elétrica em S/m;

L = comprimento em m;

R = resistência elétrica em Ω ;

A = área da seção transversal em m^2 .

A resistência elétrica (R) desempenha o papel de restringir o fluxo de corrente elétrica, sendo a resistividade elétrica (ρ) quem determina o nível desse impedimento. Assim, a resistividade elétrica representa a medida da oposição que um material apresenta à passagem de corrente elétrica em seu interior. Ela depende da geometria do material, comprimento (L), área de seção transversal (A), e de sua resistividade elétrica. Por sua vez, a resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca do material, descrevendo sua capacidade de resistir ao fluxo de corrente, ou seja, a resistência

está associada a um corpo enquanto a resistividade, ao material constituinte do corpo. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2012), a resistividade elétrica de um material é definida como a resistência elétrica de um bloco do material de dimensões unitárias (comprimento igual a 1 metro e área de seção transversal de 1 metro quadrado). Matematicamente, a resistência elétrica (R) de um material é dada pela Equação 2.

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

Onde:

R = resistência elétrica em Ω ;

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

L = comprimento em m;

A = área da seção transversal em m^2 .

A resistividade elétrica (ρ) depende das características do material, incluindo sua composição química, estrutura cristalina e sua temperatura. Materiais condutores, como metais têm baixa resistividade, enquanto materiais isolantes apresentam elevada resistividade.

Além das propriedades apresentadas, outros conceitos se fazem importantes: a piezoeletricidade e piezoresistividade. A piezoeletricidade é um fenômeno no qual certos materiais geram uma carga elétrica quando submetidos a uma deformação, respondendo a estímulos como vibrações, ondas ultrassônicas, pressão ou movimentos corporais; a piezoresistividade é um fenômeno eletromecânico no qual a resistividade elétrica de um material muda reversivelmente com deformação. Esse efeito ocorre pela criação de uma diferença de potencial elétrico ao aplicar-se uma força compressiva ao material. A intensidade da resposta piezoelétrica/piezoresistiva é influenciada pela orientação do movimento aplicado, pela capacidade piezoelétrica/piezoresistiva intrínseca do material utilizado e pelas propriedades físicas, como leveza e flexibilidade, além da polarização prévia do material (Maestri *et al.*, 2023).

2.3 TÊXTEIS INTELIGENTES

Os têxteis inteligentes são materiais que conciliam tecnologia e funcionalidade, respondendo a estímulos externos como temperatura, luz, movimento ou pressão para adaptar-se e interagir com o ambiente e o usuário (Maestri *et al.*, 2023b). A convergência entre têxteis e eletrônicos representa uma abordagem relevante para o desenvolvimento de materiais inteligentes capazes de desempenhar uma variedade de funções, comparáveis aos produtos eletrônicos rígidos e não flexíveis atualmente disponíveis no mercado. Para Stoppa (2014), os têxteis inteligentes têm o potencial de melhorar o bem-estar social e oferecer economia significativa relacionada a gastos com saúde. Esses materiais podem ser classificados em três subgrupos distintos: têxteis inteligentes passivos, que apenas detectam estímulo e não dependem de mudanças no ambiente; têxteis inteligentes ativos, que reagem a estímulos do ambiente, integrando funções atuadoras e sensores; têxteis altamente inteligentes, capazes de sentir, reagir e adaptar seu comportamento de acordo com as circunstâncias (Maestri *et al.*, 2023b).

Os têxteis inteligentes já se expandiram para áreas como saúde, transporte, segurança, esportes, construção civil e arquitetura. Em particular, dentre essas aplicações, destaca-se o desenvolvimento dos têxteis eletrônicos (*e-textiles*) que têm ganhado relevância ao incorporarem funcionalidades eletrônicas em tecidos convencionais, criando oportunidades de inovação. Um dos principais desafios para o avanço desses dispositivos é o fornecimento de energia, o que impulsiona pesquisas focadas em fontes renováveis e sustentáveis. Materiais têxteis com propriedades piezoelétricas, que convertem movimento em eletricidade, são especialmente promissores devido à sua flexibilidade e baixa espessura. Esses materiais estão sendo amplamente investigados para a criação de nanogeradores que captam a energia gerada pelos movimentos do corpo, alimentando dispositivos vestíveis de forma eficiente (Maestri *et al.*, 2023b).

2.3.1 Têxteis condutores

A condutividade elétrica é a principal propriedade física que possibilita transformar um material têxtil em um material sensorial, desempenhando um papel

essencial no desenvolvimento de dispositivos *e-textile*. Tecidos condutores podem ser utilizados como bioeletrodos ou, quando combinados com elastômeros, como sensores piezoresistivos, capazes de detectar variáveis biomecânicas (Paradiso; Caldani; Pacelli, 2014).

Os têxteis condutores são derivados de fibras, fios e tecidos, resultantes de processos de acabamento ou não, cada um possuindo propriedades de condutividade elétrica para aplicações distintas. Segundo Grancarić *et al.* (2018), esses materiais servem como pré-requisitos essenciais para o desenvolvimento de têxteis inteligentes cujas aplicações necessitam de respostas elétricas. As características desses materiais são fundamentais para garantir a funcionalidade e eficácia dos têxteis inteligentes. Conseqüentemente, é essencial compreender e aprimorá-las para promover o avanço de têxteis inteligentes mais sofisticados e duráveis.

Atualmente, especificamente tratando-se de fibras condutoras, são produzidas por meio da convergência de diferentes áreas, como a têxtil, materiais e eletrônica, oferecendo uma gama interessante de benefícios. Segundo Idumah, (2023) essas fibras são agrupadas em três categorias distintas com base nos substratos fibrosos condutores: fibras condutoras metálicas; fibras condutoras orientadas a carbono; e fibras condutoras orientadas a polímeros intrinsecamente condutores. Cada categoria de fibra condutora possui características específicas: as fibras metálicas exibem elevada resistência mecânica, condutividade elétrica, porém pouco conforto; as fibras de carbono têm elevada condutividade elétrica e as fibras poliméricas têm elevada condutividade elétrica, manufatura relativamente simples e não sofrem o processo de corrosão.

Existem diversos métodos para a produção de têxteis eletricamente condutores, incluindo a integração de monofilamentos metálicos no fio, o revestimento de fibras sintéticas com camadas condutoras e a impressão de pigmentos condutores na superfície do tecido (Paradiso; Caldani; Pacelli, 2014).

A técnica mais utilizada é a de revestimento, que envolve a aplicação de uma camada condutora sobre o substrato fibroso, sendo, portanto, uma técnica simples e de baixo custo. Já a técnica de impressão permite a deposição do material condutor diretamente sobre o substrato, garantindo uma maior versatilidade em termos de *design* e padrões, podendo também ser utilizada em larga escala. Para Tseghai *et al.* (2020), ambas as técnicas podem apresentar limitações em termos de durabilidade. O revestimento pode apresentar baixa resistência à abrasão quando utilizada em

aplicações de elevado impacto ou uso intensivo; e, a impressão, baixa resistência à lavagem.

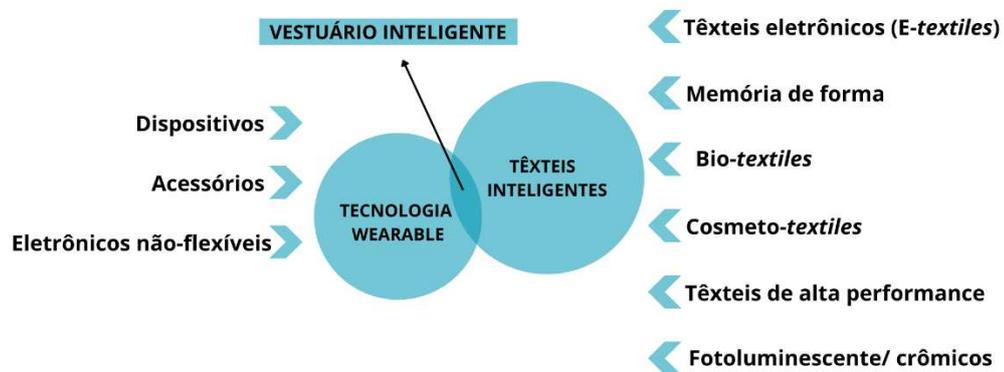
Outra abordagem de integração, segundo Tseghai *et al.* (2020), é a inserção de fios e filamentos condutores em estruturas têxteis. Este tipo de integração permite criar tecidos que são capazes de conduzir eletricidade de forma eficiente, enquanto ainda mantêm suas propriedades têxteis, como flexibilidade e conforto. A tecnologia de tecelagem permite mais possibilidades para integrar os elementos condutores durante a manufatura, além de não ter as propriedades dos fios comprometidas. Isso ocorre, uma vez que a tecnologia de tecelagem normalmente utiliza dois sistemas independentes de fios, ou seja, na direção do urdume e da trama, naturalmente indicando o uso de fios diferentes e possibilitando menor deformação dos fios quando comparado a malharia. A tecnologia de malharia também permite a inclusão de fios condutores durante o processo. Por ser um processo mais econômico para produzir pequenas amostras, é ideal para prototipagem de têxteis condutores. Além disso, com os avanços da tecnologia de malharia, abrem-se oportunidades para o *design* de roupas sem costura equipadas com sensores (Tseghai *et al.*, 2020).

Uma alternativa para a incorporação de fibras condutoras em estruturas têxteis é a tecnologia de bordado e entrançado. Em comparação com a malharia e a tecelagem, o bordado é uma opção para processos complexos e trabalhosos em design e produção, podendo apresentar flexibilidade para bordar áreas de diferentes tamanhos, formas e contornos em um plano. Já o entrançado é um processo bastante adaptável, porém existem limitações relacionadas ao próprio processo como a introdução dos materiais devido a geometria de cruzamento dos fios para formar uma peça (Tseghai *et al.*, 2020).

2.3.2 E-textiles e wearables

O “têxtil inteligente” é uma categoria que envolve tecnologias vestíveis e não vestíveis. Para Wu, Li (2019), a principal qualidade distintiva entre os têxteis inteligentes e a tecnologia *wearable*, é que os inteligentes são os materiais com maior flexibilidade e adaptabilidade. A Figura 2 apresenta um visual para ajudar a distinguir e esclarecer ainda mais a tecnologia *wearable* (vestível) e os têxteis inteligentes.

Figura 2 – Diagrama para auxiliar na distinção entre tecnologia wearable e têxteis inteligentes



Fonte: Adaptado de Wu et al. (2019).

Os termos “*e-textile*” e “*wearable*” são por muitas vezes confundidos ou utilizados de maneira equivocada. Segundo Wu *et al.* (2019), o termo “*wearable*” (ou tecnologia *wearable*, tecnologia vestível ou, quando especificamente associada ao têxtil, *wearable* têxtil) originou-se para descrever a integração de eletrônicos e computadores no vestuário ou acessórios que poderiam ser usados confortavelmente junto ao corpo, e foram motivados e possibilitados pela sucessiva onipresença de computadores, eletrônicos móveis, uso da *World Wide Web* e *big data*. No entanto, existem atualmente muitos exemplos de tecnologia avançada que também são “vestíveis”, mas que não integram necessariamente componentes eletrônicos ou informáticos. Estes pertencem ao âmbito de “têxteis inteligentes” e mais precisamente aos “*e-textiles*”.

Conforme apresentado na Figura 2, dentro do segmento dos têxteis inteligentes, se destacam os têxteis eletrônicos ou *e-textiles*. Os têxteis eletrônicos são geralmente definidos como têxteis com fios ou fibras condutoras integradas para fornecer funções inteligentes (Wu *et al.*, 2019). Fios e fibras funcionais podem ser empregados no desenvolvimento de vestuário que combinam propriedades elétricas e computacionais com as características mecânicas convencionais dos tecidos. Dessa forma, os *e-textiles* mantêm uma estrutura mecânica comparável à dos materiais têxteis comumente usados no vestuário convencional (Paradiso; Caldani; Pacelli, 2014).

Adicionalmente, incorpora-se ao vestuário elementos flexíveis como sensores, atuadores ou *microchips*. Estes componentes são essenciais para distribuir

energia elétrica aos diversos dispositivos introduzidos na peça de vestuário. Esta inovação viabiliza uma ampla variedade de funcionalidades, desde o monitoramento de sinais vitais até a comunicação e controle ambiental personalizado, ampliando significativamente as aplicações práticas das tecnologias vestíveis (Honarvar; Latifi, 2017). O Quadro 1 resume as principais distinções entre as duas tecnologias, *wearable* e *e-textile*, abordando desde sua estrutura e flexibilidade até as fontes de energia utilizadas e os tipos de aplicações mais comuns.

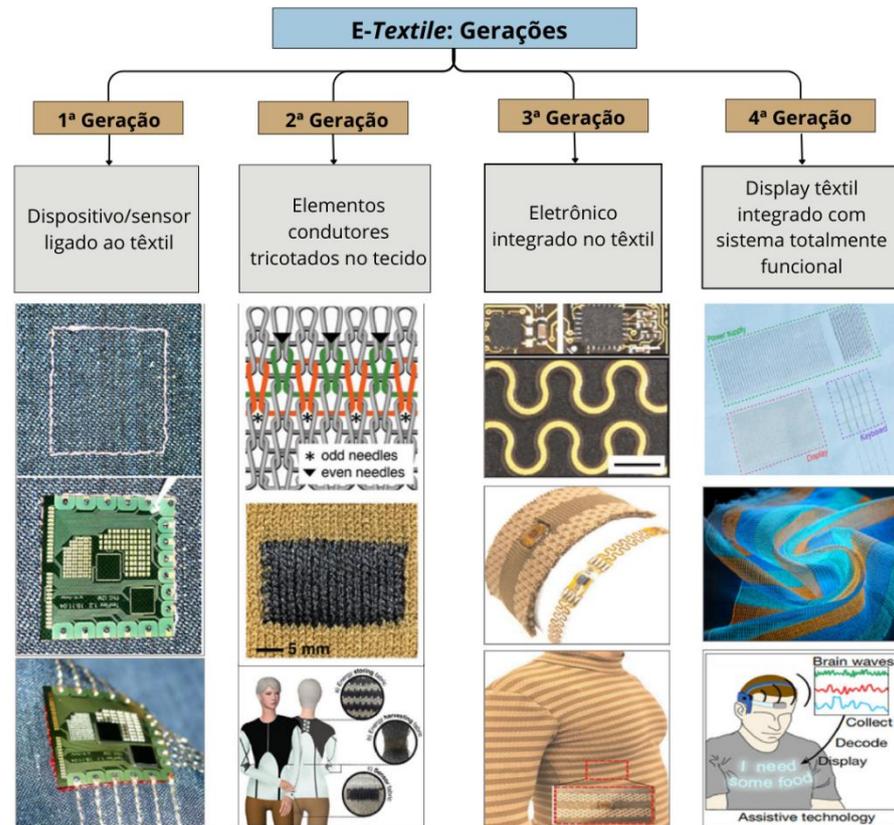
Quadro 1 – Comparação entre *wearables* e *e-textiles*

Características	<i>Wearables</i>	<i>E-textiles</i>
Definição	Dispositivos eletrônicos vestíveis, como <i>smartwatches</i> e rastreadores <i>fitness</i>	Tecidos eletrônicos com componentes embutidos
Componentes	Possuem circuitos, sensores e baterias externos	Fios condutores, sensores e camadas eletrônicas integradas no tecido
Flexibilidade	Moderada – integrantes eletrônicos são rígidos	Elevada – flexíveis e maleáveis como tecidos convencionais
Aplicações	Monitoramento de saúde, atividade física, comunicação	Vestuário inteligente, monitoramento médico e esportivo, arquitetura vestível
Fonte de energia	Principalmente baterias convencionais recarregáveis	Fontes flexíveis como materiais piezoelétricos e energia renovável

Fonte: Autora

Conforme apresentado no Quadro 1, os *e-textiles* podem ser desenvolvidos a partir de têxteis revestidos com materiais condutores e que apresentam, como fonte de energia, materiais piezoelétricos. Portanto, o material do presente trabalho surge como uma possibilidade para o desenvolvimento de um *e-textile* nestas mesmas condições.

Desde o início da era dos têxteis eletrônicos, foram demonstradas várias formas de integrar a eletrônica nos substratos têxteis. Meena (2023) categorizou os desenvolvimentos em têxteis eletrônicos em várias fases, referidas como a primeira à quarta geração desta tecnologia, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Classificação de *e-textile*

Fonte: Adaptado de Meena et al (2023).

Os têxteis eletrônicos de primeira geração envolvem um componente rígido, como uma antena ou um dispositivo eletrônico, costurado ou preso à superfície substrato têxtil, que serve como base para a recepção desse acessório. Já na segunda geração, os fios condutores são tricotados ou tecidos na estrutura têxtil para torná-la eletronicamente inteligente. A terceira geração consiste em sensores e eletrônicos incorporados ao vestuário/acessório em si, sendo mais adequados do que os e-têxteis das duas primeiras gerações para produzir sistemas eletrônicos duráveis, confiáveis e principalmente, confortáveis. A quarta geração representa o futuro desta tecnologia, que consiste na capacidade de integrar totalmente a funcionalidade eletrônica, garantindo ainda aspectos relacionados a maciez, conforto, flexibilidade, lavabilidade e durabilidade. Atualmente, sua fabricação consiste em escala laboratorial e existem apenas como projetos conceituais e/ou protótipos (Meena et al., 2023).

2.4 POLÍMEROS INTRINSICAMENTE CONDUTORES

Os polímeros intrinsecamente condutores demonstram uma ampla capacidade de condução elétrica, combinando propriedades típicas de materiais poliméricos, como leveza, flexibilidade e processabilidade. Segundo Mattana (2011), esses polímeros desempenham um papel crucial no avanço dos têxteis inteligentes, pois podem exibir comportamento condutivo ou semicondutor, proporcionando condução elétrica. A popularidade desses polímeros como materiais condutores é impulsionada por sua leveza, baixo custo e capacidade de ajuste da condutividade elétrica por meio de processos de dopagem. Para Grancarić *et al.* (2018), eles também oferecem biocompatibilidade e facilidade de preparação quando comparados aos metais e materiais orientados a carbono, podendo ser adaptados para funções de detecção e atuação. Portanto, os polímeros condutores representam uma opção versátil e promissora para uma variedade de aplicações, desde eletrônica vestível até dispositivos biomédicos avançados.

Nos últimos anos, as pesquisas envolvendo polímeros condutores têm ganhado crescente popularidade, evidenciando uma variedade significativa desses materiais. Segundo Goyal *et al* (2024), há mais de 25 tipos de polímeros condutores identificados, onde destacam-se com aplicação de pesquisa aplicada na área têxtil devido às suas propriedades e potenciais aplicações: poli(3,4-etilenodioxitiofeno) poliestireno sulfonato (PEDOT:PSS), polianilina (PANI) e polipirrol (PPy).

O PEDOT:PSS, um tipo de politiofeno (polímero π -conjuntivo), é reconhecido como um polímero condutor altamente promissor, destacando-se por sua excelente estabilidade térmica e química, além de apresentar baixo custo de produção, resistência à corrosão e biocompatibilidade (Ryan *et al.*, 2022). Estudos conduzidos por Zhang *et al.* (2017) demonstraram o potencial do PEDOT:PSS ao revestir um tecido de algodão comercial, evidenciando suas capacidades de aquecimento. Isso levou à produção de uma luva térmica macia, leve e respirável, expandindo as possibilidades de aplicação desse polímero condutor em produtos têxteis. Além disso, Cunha (2022) desenvolveu um processo de revestimento de tecido de poliéster com PEDOT:PSS, ativando-o através de tratamento superficial de plasma atmosférico, resultando em um casaco com auto aquecimento. Entretanto, o resultado obtido pode ser adaptável para diversas superfícies têxteis. Esses avanços na aplicação do PEDOT:PSS para o desenvolvimento de tecidos termoelétricos abrem novas

perspectivas para o desenvolvimento de produtos têxteis multifuncionais, capazes de oferecer conforto térmico e funcionalidades.

A polianilina (PANI) é um polímero amplamente reconhecido por sua acessibilidade econômica, facilidade de síntese e sua estabilidade ao ser exposto a condições ambientais, tornando-se uma escolha versátil em uma variedade de aplicações (Ryan *et al.*, 2022). Em uma pesquisa conduzida por Zou *et al.* (2020) foi desenvolvido um tecido revestido com nanotubos de carbono e PANI para produzir uma blindagem eletromagnética. Esse tecido demonstrou resistência a processos como lavagem, sonicação, ácidos e álcalis, destacando-se como uma solução eficaz para aplicações que requerem proteção contra radiações eletromagnéticas. Outro estudo, realizado por Zhou *et al.* (2021), explorou o revestimento de um tecido de malha de algodão com PANI por meio do método de deposição. Esse tecido de malha demonstrou excelente desempenho na detecção de movimentos, possibilitando o monitoramento de sinais físicos e movimentos humanos. A mudança na resistência elétrica do sensor do tecido foi utilizada para monitorar movimentos em partes específicas do corpo humano, como joelhos, cotovelos e dedos. Essas pesquisas evidenciam o potencial do PANI na criação de materiais têxteis avançados com funcionalidades diversas, desde a proteção contra radiações eletromagnéticas até o monitoramento de movimentos corporais em tempo real. Esses avanços oferecem ótimas perspectivas para o desenvolvimento de têxteis inteligentes e adaptáveis para uma variedade de aplicações práticas.

O PPy é um dos polímeros condutores mais amplamente estudados, devido às suas notáveis propriedades que incluem elevada condutividade elétrica, facilidade de síntese, boa estabilidade ambiental, não toxicidade e biocompatibilidade. Essas características despertam um grande interesse, especialmente na área biomédica (Ryan *et al.*, 2022). Em um estudo conduzido por Steele *et al.* (2018) foi desenvolvido um sutiã denominado "*Bionic Bra*", utilizando sensores eletromateriais de PPy encapsulado. Esse sutiã emprega tecnologia capaz de simular músculos artificiais para oferecer suporte adequado, mas também se ajustar dinamicamente às mudanças na forma e no movimento da mama. Ao incorporar materiais eletrocondutivos, o sutiã pode detectar alterações sutis no movimento da mama e responder com ajustes precisos na compressão e no suporte, oferecendo maior conforto e reduzindo o risco de lesões durante a atividade física. Outra pesquisa relevante, realizada por Munro *et al.* (2008), resultou no desenvolvimento de um

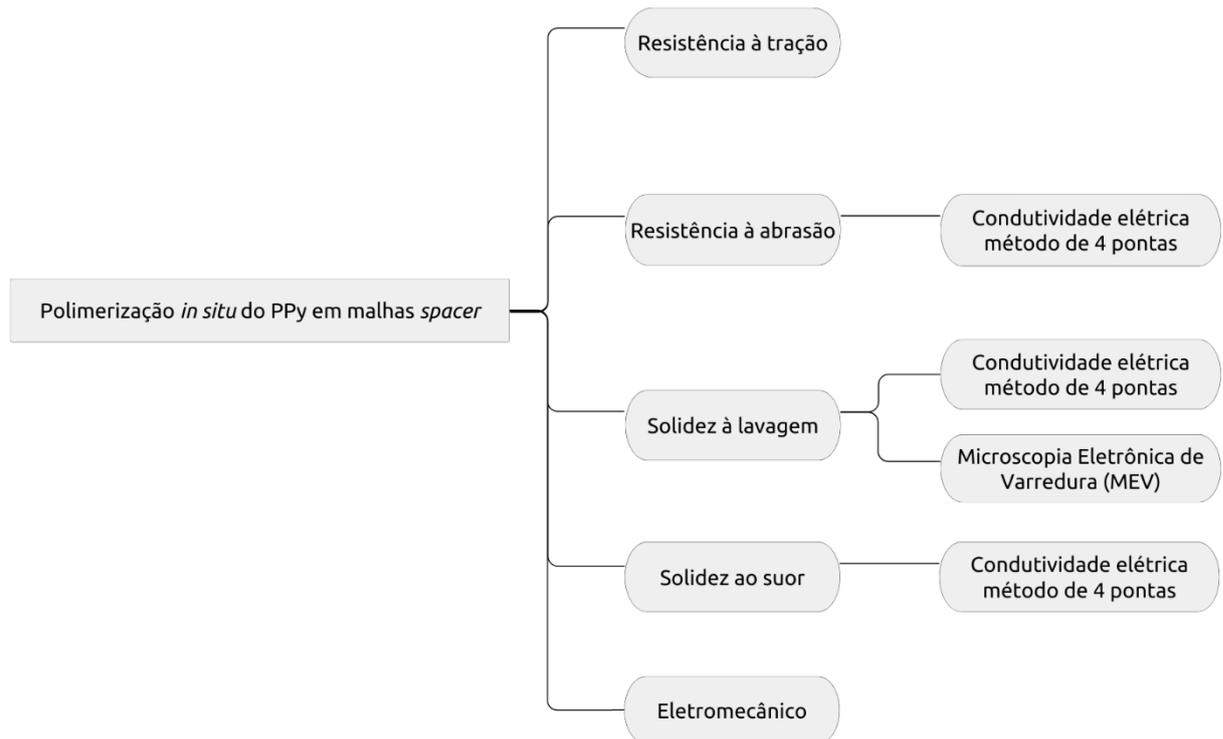
dispositivo conhecido como "*The Intelligent Knee Sleeve*". Esse dispositivo consiste em uma joelheira elástica que incorpora uma malha de poliamida e lycra revestida com PPy. Integrado com um sensor de circuito eletrônico apropriado, quando colocado sobre o joelho, fornece retorno para alertar sobre o limite desejado de flexão. Esses estudos evidenciam as vastas aplicações e o potencial do PPy na criação de dispositivos biomédicos inovadores e destacam o papel dos polímeros condutores na promoção da qualidade de vida e no desenvolvimento de soluções tecnológicas para diversas necessidades médicas e de bem-estar.

Independentemente do tipo de polímero utilizado, observou-se, portanto, que de maneira geral os estudos sobre têxteis revestidos com polímeros intrinsecamente condutores costumam priorizar parâmetros como medida da condutividade e eficiência de síntese durante o revestimento, mas raramente abordam a simulação frente ao uso, verificando, por exemplo, a eficiência dos materiais após desgastes que podem ocorrer no cotidiano, como lavagens repetidas, exposição ao suor, abrasão e também ciclos de compressão mecânica. Esse enfoque limitado deixa uma lacuna importante na compreensão do comportamento desses materiais em aplicações vestíveis, onde a resiliência das propriedades condutoras ao longo do tempo é essencial para garantir desempenho estável e seguro para o usuário. Diante disso, justifica-se o desenvolvimento deste trabalho, que visa explorar a usabilidade da malha *spacer* revestida com PPy frente a esses processos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos empregados no desenvolvimento deste trabalho. A execução prática do estudo foi dividida em seis etapas, conforme ilustrado na metodologia experimental mostrada na Figura 4.

Figura 4 – Metodologia experimental



Fonte: Autora

3.1 MATERIAIS

O substrato têxtil utilizado foi uma malha *spacer* produzida em tear circular duplafrentura com filamentos de poliéster (PES) e elastano (PUE) nas duas camadas externas e monofilamento de PES como fio de ligação, fornecida pela Indústria e Comércio de Malhas Benvenuti LTDA (BENUTEX Malhas).

Para a polimerização *in situ* do polipirrol foram utilizados monômero de pirrol líquido da marca Sigma-Aldrich, cloreto férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) da marca Dinâmica e água destilada.

Para o ensaio de solidez à lavagem foi utilizado o sabão líquido sem adição de branqueador da marca CasaKm e água destilada. Para o ensaio de solidez ao suor ácido e alcalino foram utilizadas as soluções de suor ácido e alcalino da marca Mh3.

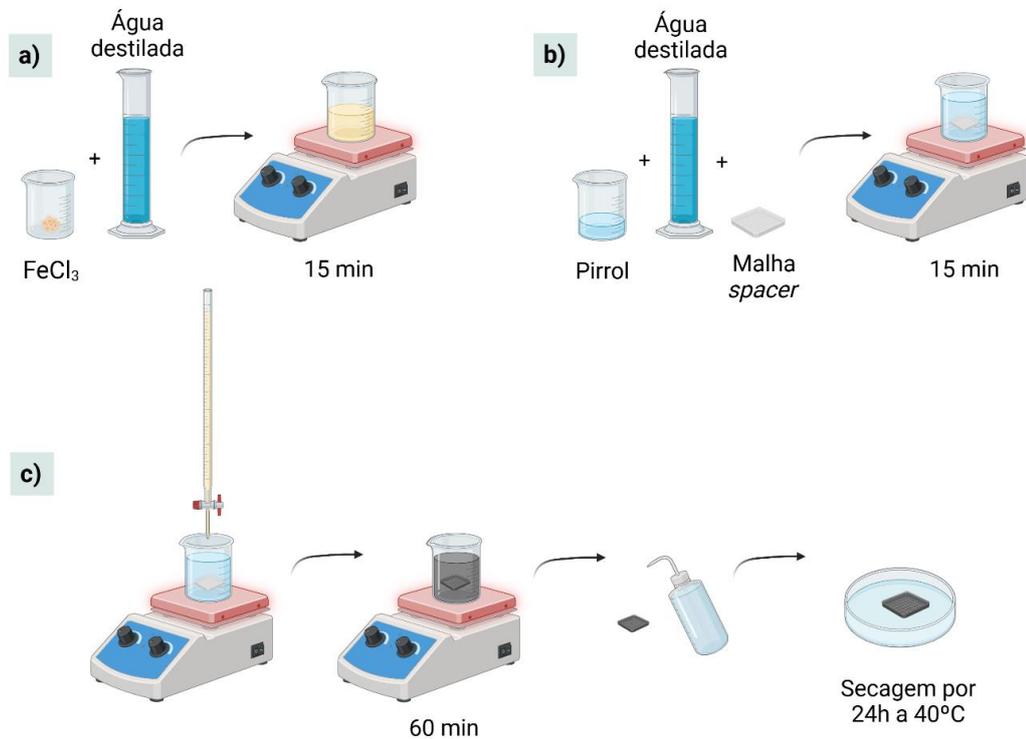
3.2 MÉTODOS

3.2.1 Obtenção da malha *spacer* revestida com polipirrol

A polimerização do pirrol na superfície da malha *spacer* seguiu a metodologia reportada por Gueths (2023). A definição da concentração e tempo a serem utilizados foi baseada no melhor resultado de condutividade elétrica obtido pela autora, sendo de 0,050 mol/L e 60 min, respectivamente. A razão molar utilizada entre o cloreto férrico hexahidratado e o pirrol foi de 2:1. Para todos os ensaios realizados foram obtidas amostras em triplicata com dimensões de 40x40 mm. O recobrimento das amostras ocorreu no Laboratório de Tecidos e Malhas (LABTEC), na UFSC, Campus Blumenau.

A Figura 5 apresenta um esquema ilustrativo do processo experimental da polimerização *in situ* do pirrol nas amostras de malha *spacer*. Na primeira etapa, o cloreto férrico é dissolvido em água destilada durante 15 min em temperatura ambiente (Figura 5-a). Simultaneamente, ocorre a dispersão do pirrol (Figura 5-b), onde o pirrol é homogeneizado em água destilada juntamente com a amostra de malha durante 15 min em temperatura ambiente. Após finalizado este tempo, a solução de cloreto férrico é colocada em uma bureta graduada que é gotejada lentamente no béquer contendo o pirrol e a malha *spacer*. Com o cessar do gotejamento, a solução permanece em agitação durante 60 min. Após finalizado este período, a malha *spacer* é lavada cuidadosamente com água destilada e seca na estufa durante 24 h em 40 °C, até secar completamente (Figura 5-c).

Figura 5 – Esquema ilustrativo do processo de polimerização *in situ* do pirrol em malha spacer



Fonte: Autora

3.2.2 Caracterização da malha *spacer* funcionalizada

3.2.2.1 Resistência à tração

O ensaio de tração foi realizado nas malhas *spacer* antes e após o revestimento do pirrol no substrato com adaptação da norma ISO 13934-1:2016, tanto na direção das colunas como das fileiras, em triplicata, a fim de verificar possíveis mudanças nas propriedades mecânicas da malha. As malhas apresentavam as dimensões de 40x40 mm. Foi utilizado a máquina universal de ensaios da marca Instron, presente no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM), na UFSC, Campus Blumenau. A taxa utilizada no equipamento foi de 100 mm/min.

3.2.2.2 Resistência à abrasão

O ensaio de abrasão foi realizado nas malhas *spacer* antes e após o revestimento com polipirrol. O ensaio foi baseado na norma ISO 12947-2:2016, a fim de verificar alterações na superfície da malha após repetidos ciclos de abrasão. Após os ciclos, também foi analisada a condutividade elétrica das amostras. As malhas foram cortadas em triplicata com dimensão de 38 mm de diâmetro e aplicado uma

carga de 12 KPa. Simulou-se 10.000 ciclos de abrasão para cada amostra. O equipamento utilizado foi o abrasímetro Martindale da marca Texcontrol, modelo TC 145, presente no LABTEC, na UFSC, Campus Blumenau.

3.2.2.3 *Resistência à lavagem*

O ensaio de solidez à lavagem foi realizado nas malhas *spacer* após o revestimento com polipirrol seguindo adaptação da norma ISO 105 C06:2010, a fim de verificar alterações na massa e nos valores de condutividade elétrica das amostras. Simulou-se 15, 20 e 25 ciclos de lavagem, em triplicata. As amostras foram colocadas em erlenmeyers com água e detergente líquido sem branqueador na concentração de 4 g/L, sem esferas, durante 30 minutos, na temperatura de 40 °C. O equipamento utilizado foi o Shaker da marca New Lab, modelo NL-343-01, presente no Laboratório de Meio Ambiente (LABMAM), na UFSC Campus Blumenau.

3.2.2.4 *Resistência ao suor*

O ensaio de solidez ao suor foi realizado nas amostras revestidas com polipirrol seguindo a norma ISO 105-E04:2014, a fim de verificar alterações na condutividade elétrica após contato com as soluções que simulavam o suor, tanto ácido como básico. Escolheu-se essas duas soluções porque o suor humano é inicialmente ácido ao ser expelido pelo corpo, no entanto, devido à atividade bacteriana na pele, ele se torna alcalino, com um aumento na quantidade de amônia resultante desse processo (Bilir; Gök, 2017). As amostras foram submersas em triplicata em cada solução durante 30 minutos. Após esse período foram secas em estufa com temperatura de 40°C durante 24 horas. O teste foi realizado no LABTEC, na UFSC, Campus Blumenau.

3.2.2.5 *Condutividade elétrica pelo método de 4 pontas*

As amostras de malha *spacer* revestidas com polipirrol foram submetidas ao ensaio de condutividade elétrica pelo método de 4 pontas. Neste método é aplicada uma determinada corrente elétrica na superfície da amostra. Para o ensaio, foram utilizados um eletrômetro Keythley, modelo 6517A para a leitura da tensão e uma unidade de fonte e medida (SMU) Keythley, modelo 2410 para o fornecimento da corrente, presente no Laboratório de Polímeros e Compósitos (POLICOM), na UFSC, Campus Florianópolis. Foram realizadas 3 medidas em diferentes locais da amostra, em ambos os lados. A condutividade (σ) foi obtida por intermédio da Equação 3. O

método de 2 pontas se limita a faixa entre 10^{-7} e 10^{-17} S/cm, sendo mais usado para amostras mais resistivas. Enquanto o método de 4 pontas é utilizado para leituras acima de 10^{-6} S/cm.

$$\sigma = \frac{I}{V} \times \frac{\ln 2}{\pi} \times \frac{1}{w} \quad (3)$$

Onde:

σ = condutividade elétrica em $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;

I = corrente elétrica fornecida em A;

V = tensão elétrica mensurada em V;

w = espessura da amostra em cm;

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

3.2.2.6 *Ensaio eletromecânico*

O ensaio eletromecânico foi realizado nas malhas *spacer* revestidas com polipirrol antes e após os ciclos de lavagem. O teste foi realizado em triplicata pelo método de compressão da malha, onde simulou-se 5 ciclos, a fim de verificar o comportamento piezoresistivo das amostras. As malhas apresentavam as dimensões de 25 mm de diâmetro e foram aplicadas diferentes tensões: 250 KPa, 500 KPa e 1000 KPa. Foi utilizado a máquina universal de ensaios EMIC DL 2000, presente no Laboratório de Análises Térmicas, na UFSC, Campus Florianópolis.

As informações foram obtidas e analisadas utilizando um software específico, com o auxílio de uma interface eletrômetro-computador (Keithley, modelo KUSB-488B). A Equação 4 apresenta a relação que descreve a resposta piezoresistiva do material.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (4)$$

Onde:

R = resistência elétrica em Ω ;

R_0 = resistência do material em Ω ;

.3.2.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

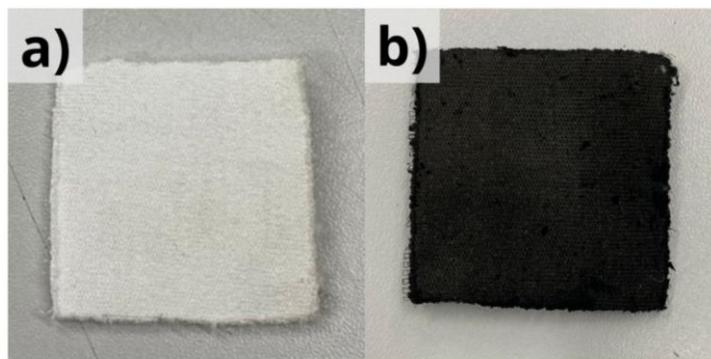
As malhas *spacer* revestidas com polipirrol foram analisadas através do MEV a fim de avaliar a morfologia antes e após os ciclos de lavagem. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico da marca Jeol, modelo JSM-6390LV, presente no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), na UFSC, Campus Florianópolis. As amostras foram depositadas em *stubs* e depois revestidas com ouro para as leituras com magnitudes de ampliação de 35 x, 100 x e 500 x.

4 RESULTADOS

4.1 REVESTIMENTO DA MALHA SPACER COM POLIPIRROL

O método utilizado para revestir a malha *spacer* com polipirrol foi realizado conforme o item 3.2.1. Durante o processo de polimerização, o PPy vai tornando o substrato escuro (Figura 6), confirmando o revestimento. Após a secagem da amostra, foi possível observar, pelo toque manual das amostras, que elas soltam uma leve quantidade de resíduo.

Figura 6 – Amostra a) sem revestimento, b) após revestimento



Fonte: Autora

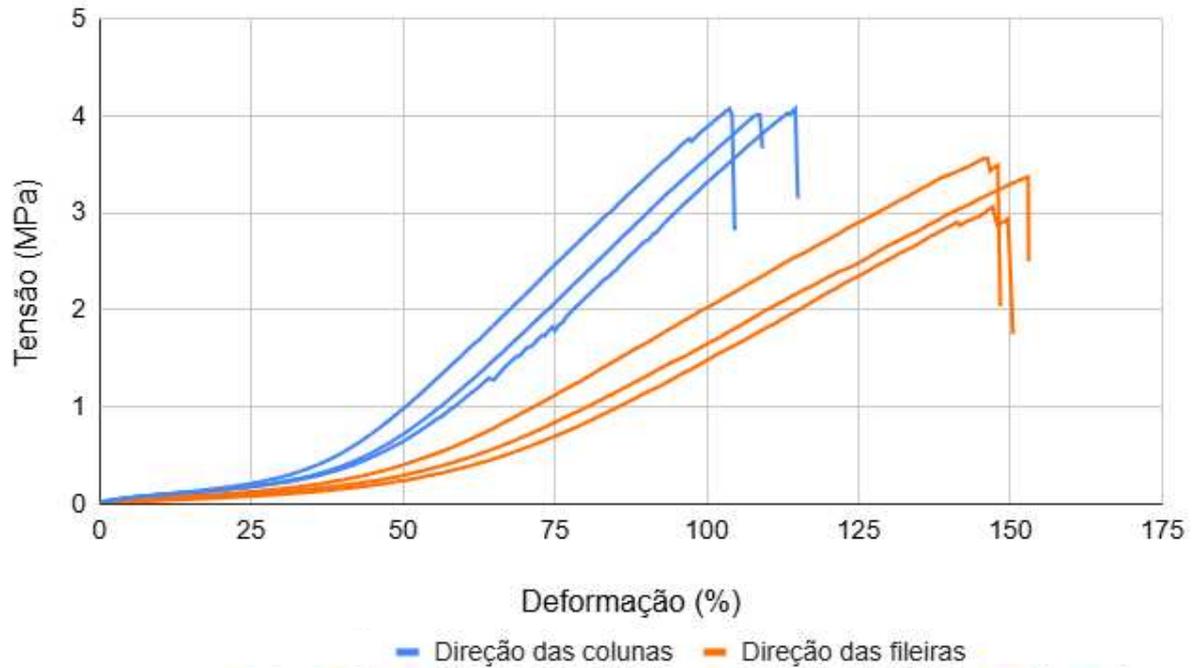
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MALHA SPACER REVESTIDA

4.2.1 Resistência à tração

As Figuras 7 e 8 ilustram o comportamento das malhas *spacer* antes e após o revestimento frente ao ensaio de tração na direção das colunas e das fileiras. As amostras antes do revestimento apresentam uma tensão de ruptura média na direção das fileiras de $4,01 \pm 0,03$ MPa e na direção das colunas de $3,56 \pm 0,24$ MPa. Já as amostras revestidas apresentam tensão de $4,36 \pm 0,01$ MPa na direção das fileiras e $3,59 \pm 0,15$ MPa para as colunas. Nota-se que há um pequeno aumento na tensão de ruptura em ambas as direções nas amostras revestidas com PPy. Verifica-se uma redução na deformação, principalmente na direção das fileiras, após a polimerização, em 84,7%, indicando que o polímero influencia nas propriedades mecânicas das amostras, tornando a amostra mais rígida. Esse comportamento também foi

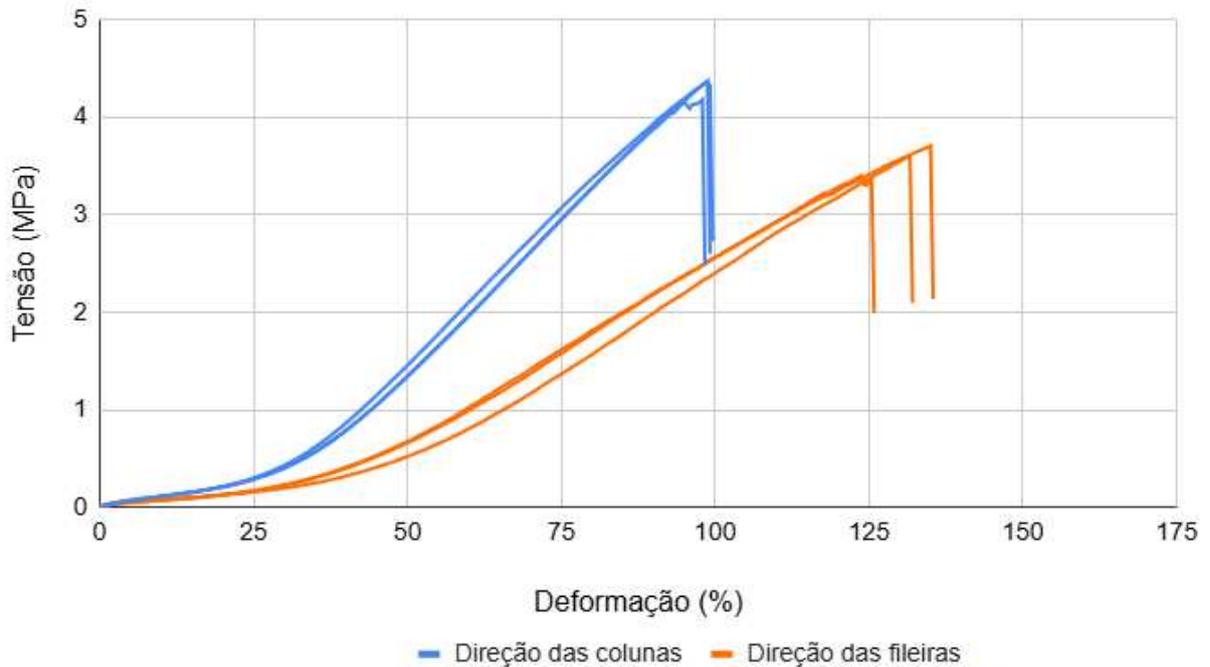
observado por Yildiz, Usta e Gungor (2012), que relataram que, conforme o aumento da concentração de PPy, houve uma diminuição no alongamento da fibra de poliéster.

Figura 7 – Curva tensão x deformação da malha *spacer* antes da funcionalização



Fonte: Autora

Figura 8 – Curva tensão x deformação da malha *spacer* revestida

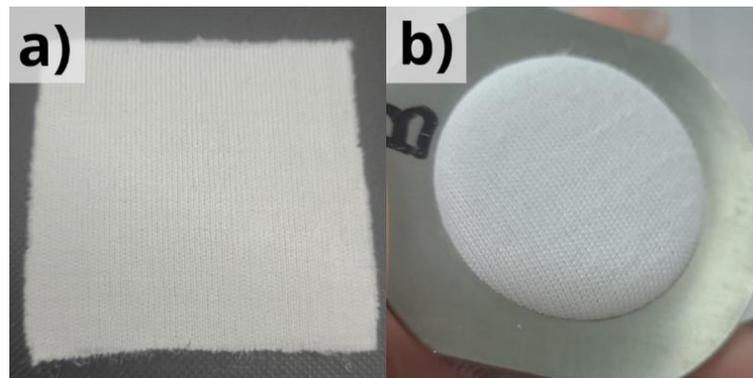


Fonte: Autora

4.2.2 Condutividade elétrica após abrasão

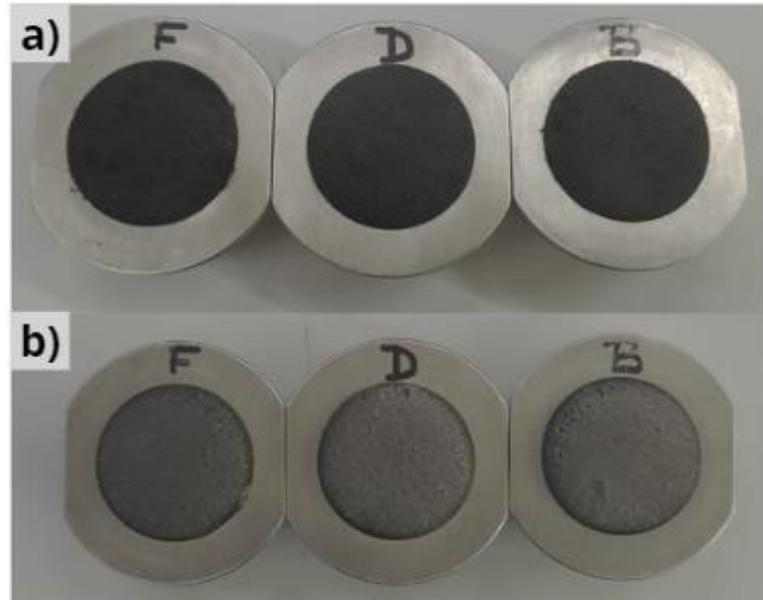
Para o ensaio de abrasão no Martindale, a cada 1.000 ciclos as amostras (sem e com revestimento) eram verificadas a fim de que fosse observado algum tipo de alteração na sua superfície, como furos ou rasgos, seguindo o procedimento até 10.000 ciclos. A amostra padrão (sem revestimento) apresentou apenas o levantamento de algumas fibras sem sofrer rompimento na sua estrutura, conforme apresentando na Figura 9. Nas amostras com revestimento ocorreu o aparecimento de pequenos furos/rasgos na superfície das amostras (Figura 10). Esse comportamento sugere um possível enfraquecimento das fibras na estrutura após a funcionalização.

Figura 9 – Amostra sem revestimento (padrão): a) antes, b) após 10.000 ciclos de abrasão



Fonte: Autora

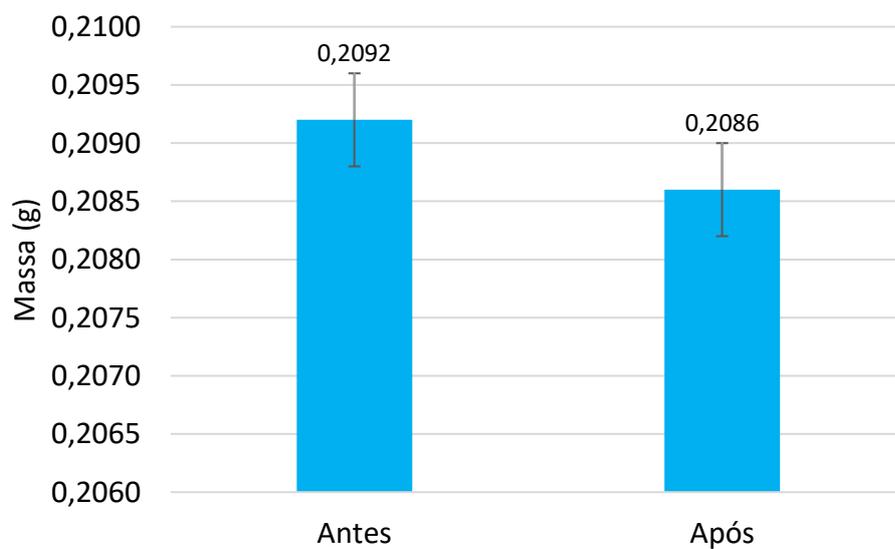
Figura 10 – Amostras revestidas com polipirrol: a) antes da abrasão, b) após 10.000 ciclos de abrasão



Fonte: Autora

Referente à perda de massa ocasionada pelo processo de abrasão, os valores estão apresentados no gráfico apresentado na Figura 11. Observa-se que após 10.000 ciclos de abrasão, apesar de visualmente as amostras terem alterado sua cor visualmente (Figura 10), as amostras tiveram pouca perda de massa, cerca de 0,28%, o que pode sugerir uma boa adesão do polipirrol na estrutura da malha *spacer*.

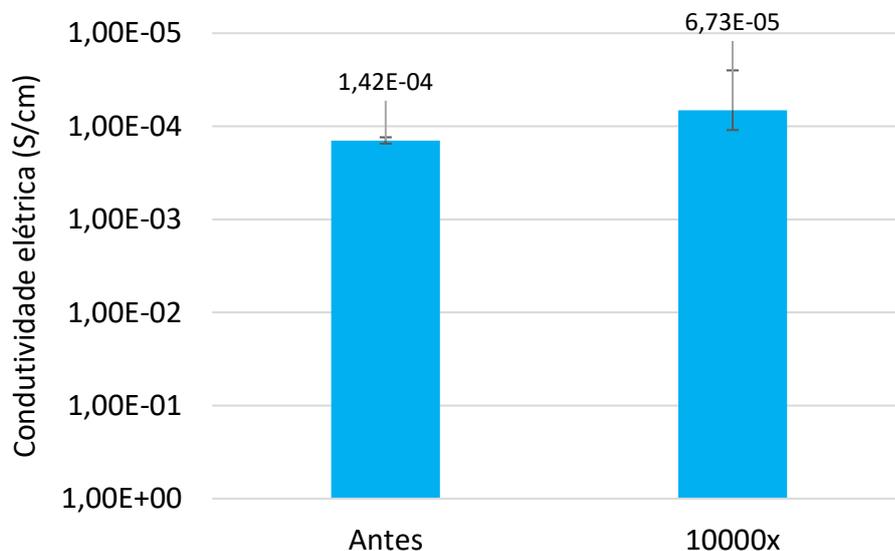
Figura 11 – Gráfico de perda de massa antes e após abrasão



Fonte: Autora

Após o ensaio de abrasão, as amostras foram analisadas quanto a condutividade elétrica pelo método de 4 pontas. Na Figura 12 é possível observar os valores de condutividade obtidos antes e após os ciclos de abrasão. Observa-se a redução na condutividade elétrica do material, ocasionada pela perda de polipirrol no substrato, com a alteração de uma ordem decimal para o ciclo de abrasão, demonstrando que esta propriedade sofre pequenas alterações neste processo. Tal comportamento também foi observado por Deogaonkar (2020), ao realizar o teste de abrasão em uma amostra de tecido mescla poliéster/algodão revestido com PPy. Nesse estudo, foram realizados 2.500 ciclos de abrasão e percebido um aumento na resistividade, de 210 Ω/sq para 580 Ω/sq . No trabalho supracitado, durante os 2.500 ciclos, não foi observado rasgos/furos, apenas a alteração de cor da amostra. A diferença no desvio padrão pode ser justificada devido aos pontos analisados em cada amostra, que são diferentes e podem conter quantidades distintas de polipirrol, principalmente após os ciclos no abrasímetro.

Figura 12 – Gráfico da condutividade elétrica antes e após ciclos de abrasão



Fonte: Autora

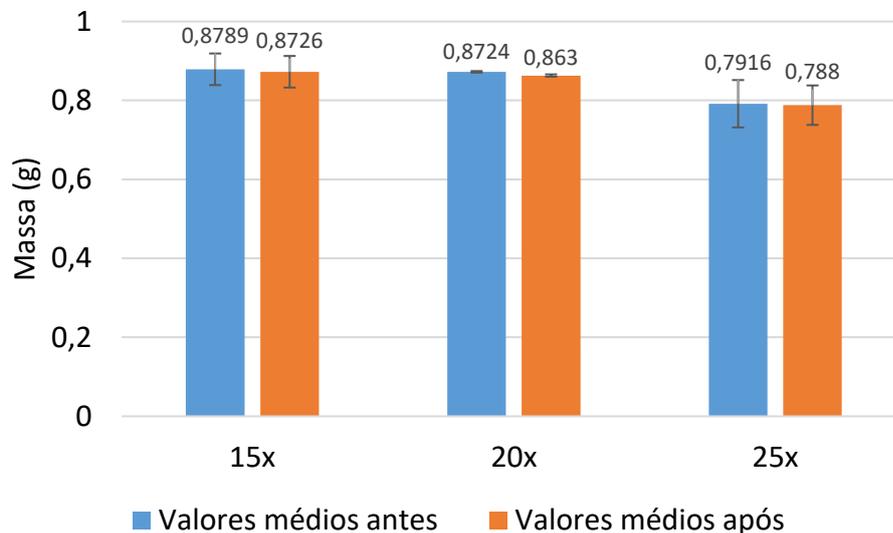
Vale ressaltar que o valor de condutividade obtido antes da abrasão está próximo ao obtido por Gueths (2023) de $4,39 \times 10^{-4}$ S/cm e que os valores referenciais de condutividade elétrica do PPy, quando analisado isoladamente, é na ordem de 10^{-6} a 10^4 S/cm (Maestri *et al.*, 2023). Portanto, os resultados obtidos antes e após a abrasão são satisfatórios.

4.2.3 Condutividade elétrica após ciclos de lavagens

Para o ensaio de solidez à lavagem, foram realizados ciclos de 15 x, 20 x e 25 x lavações, a fim de simular lavações convencionais de um substrato têxtil. Assim, como no ensaio de resistência à abrasão, após os ciclos de lavagem foi analisada a perda de massa e verificado a condutividade elétrica das amostras. Além disso, analisou-se por meio de micrografias alterações morfológicas nas amostras.

Em relação à perda de massa, observa-se que a redução não ocorreu de forma linear. No entanto, ao comparar os três ciclos, pode-se concluir que as diferenças entre eles não são significativas quando se analisa o desvio padrão. Também se observa que as médias relacionadas a massa antes e após 25 ciclos foram menores quando comparadas aos outros ciclos. Isso se deve ao fato de que essas amostras ficaram um pouco menores em dimensão que as demais. Ressalta-se que todos os três ciclos tiveram pouca perda de massa, caracterizando novamente uma boa adesão do polipirrol ao substrato (Figura 13).

Figura 13 – Perda de massa antes e após ciclos de lavagem

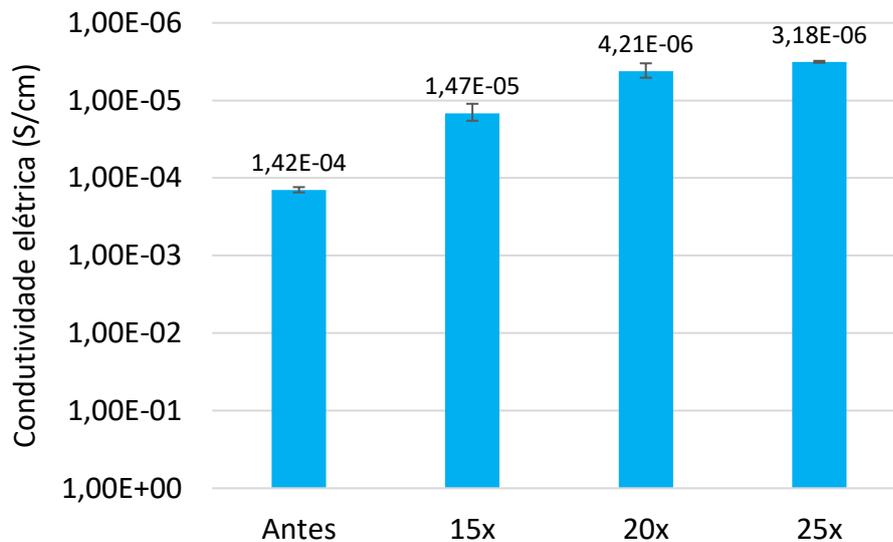


Fonte: Autora

Para a condutividade elétrica, assim como foi observado nas análises de abrasão, conforme aumenta-se o número de lavagens reduz-se a condutividade, o que pode ser observado no gráfico da Figura 14. As amostras com 20 e 25 ciclos obtiveram a mesma ordem decimal sugerindo não haver diferença considerável na condutividade entre elas. Diante disso, pode-se observar que há um limite o qual as

amostras reduzem em condutividade. Comportamento semelhante foi observado por Luo, Chen e Shi (2024) ao realizar o ensaio de solidez à lavagem em malhas *spacer* por urdume de poliéster revestidas com PPy. Nesse estudo, observou-se que com o aumento do tempo de lavagem, a resistividade do tecido condutor aumentava significativamente. A resistência do tecido estabilizava quando o tempo de lavagem excedia 120 min. Não há informação da quantidade de ciclos realizados nos testes.

Figura 14 – Condutividade elétrica antes e após ciclos de lavagem

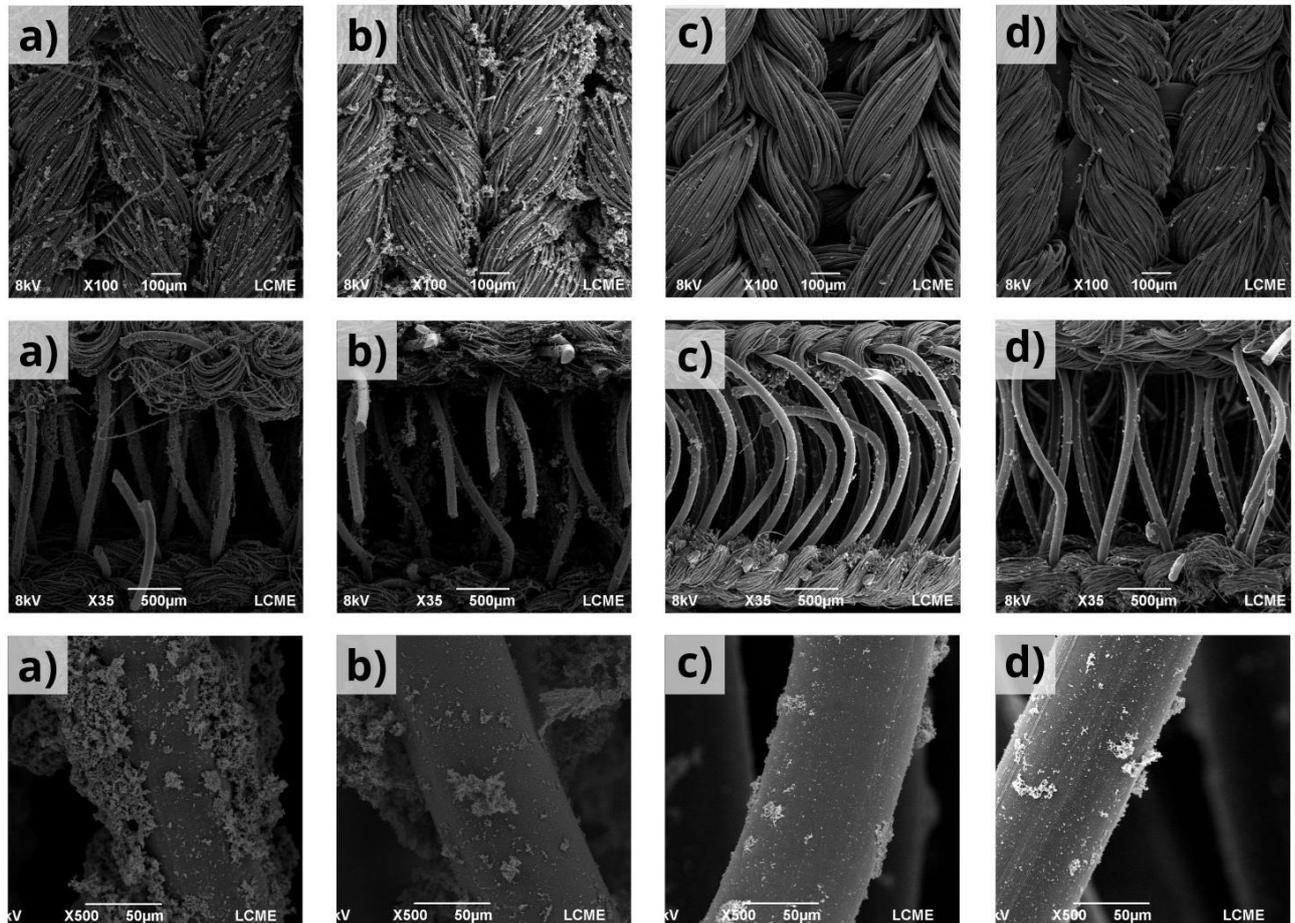


Fonte: Autora

4.2.4 Análise morfológica das amostras após ciclos de lavagens

Após a lavagem das amostras também foram realizadas análises de MEV para a visualização do PPy sobre a estrutura. Na Figura 15 pode-se verificar as microscopias referentes à malha revestida antes e após 15 x, 20 x e 25 x ciclos de lavagem, respectivamente. Foram obtidas micrografias das vistas longitudinal e transversal a fim de se verificar a adesão do PPy também nos fios de ligação da malha *spacer*. É possível observar com maior nitidez que na superfície da malha houve uma maior redução dos aglomerados de PPy a partir de 20 ciclos de lavagem. Já nos fios de ligação é visível essa redução a partir de 15 ciclos de lavagem. De acordo com o estudo de Gueths (2023), onde foram realizadas 1, 5 e 10 ciclos de lavagem, foram observados aglomerados semelhantes aos obtidos com 15 ciclos de lavagem, novamente sugerindo-se que a partir de 20 ciclos há um maior desprendimento e portando redução da condutividade, conforme visto anteriormente.

Figura 15 – Micrografias em vista longitudinal, transversal e dos fios de ligação: a) antes da lavagem, b) após 15 x c) após 20 x e d) após 25 x, com aumento de 100 x, 35 x e 500 x.

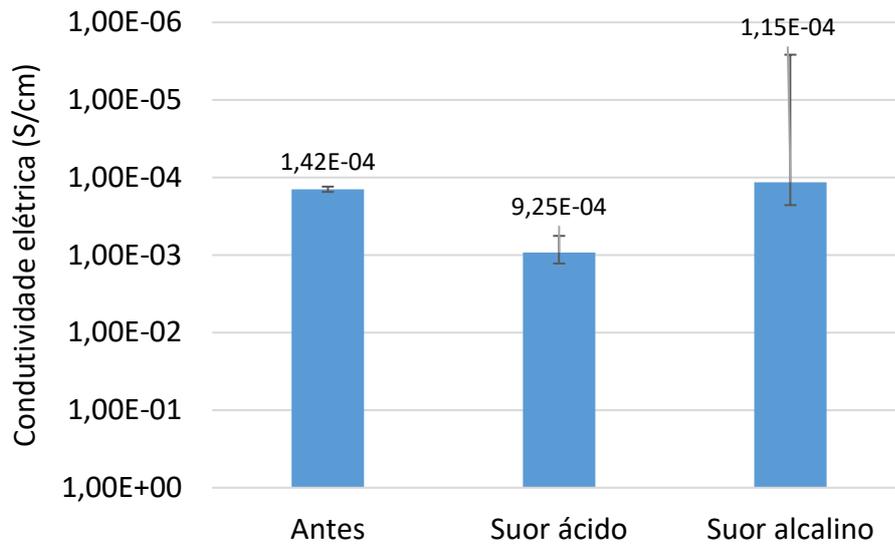


Fonte: Autora

4.2.5 Condutividade elétrica após suor ácido e alcalino

Após o ensaio de solidez ao suor, as amostras foram analisadas quanto a condutividade elétrica pelo método de 4 pontas. Na Figura 16, é possível observar os valores de condutividade obtidos antes e após a solidez ao suor. A condutividade não é afetada pelo contato com o suor, mantendo a ordem decimal de antes do ensaio. Tal resultado também foi observado por Bilir e Gök (2017), após medir a condutividade de amostras de poliamida revestidas com prata, secas e ainda molhadas, após ensaio de solidez ao suor ácido e alcalino. Não foram encontrados na literatura estudos de solidez ao suor em amostras contendo polipirrol.

Figura 16 – Condutividade antes e após solidez ao suor ácido e alcalino



Fonte: Autora

4.2.6 Eletromecânico

O ensaio eletromecânico foi realizado com as amostras revestidas antes e após os ciclos de lavagem apresentados anteriormente. As Figuras 17, 18 e 19 exibem gráficos das respostas piezoresistivas obtidas a partir das tensões de 250 KPa, 500 KPa e 1000 KPa sob função do tempo de ensaio para 5 ciclos de repetição. Nos gráficos é possível observar na esquerda o comportamento compressivo, ou seja, a variação de pressão que a amostra sofre, sinalizado nos gráficos nas curvas de cor laranja. Já na direita é ilustrada a variação da resistividade, representada nos gráficos na cor azul. Conforme a pressão é aplicada, observa-se uma redução da resistividade, o que se dá pela aproximação das partículas de polipirrol; conseqüentemente, verifica-se o aumento da condutividade elétrica do material analisado.

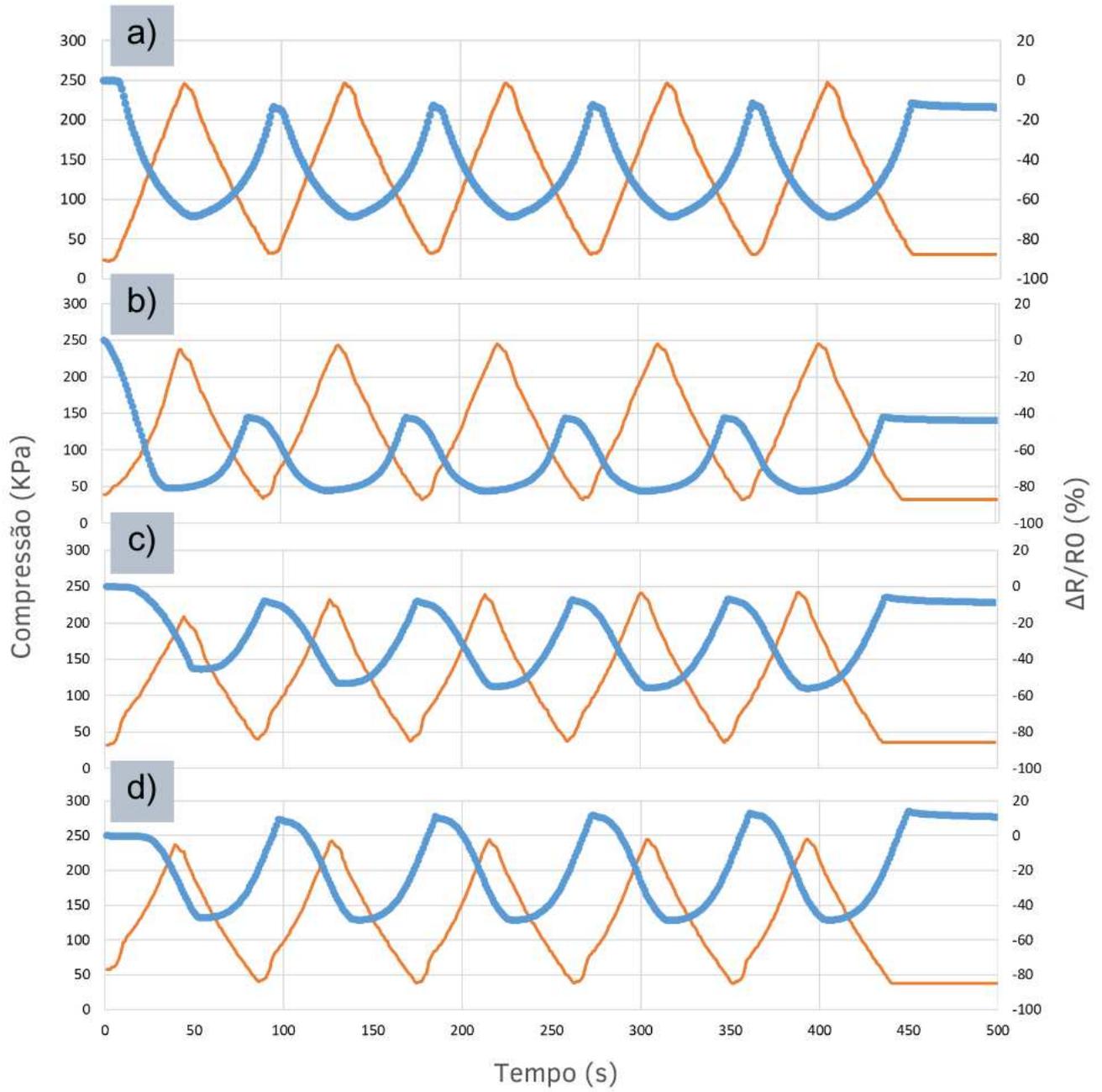
Observa-se que as amostras com 20 e 25 ciclos de lavagem sob a tensão de 250 KPa não obtiveram vales regulares aos picos de tensão, o que pode ser justificado pelo polipirrol e o substrato não terem atingido o nível de deformação que promova uma resposta estável e uniforme, visto que essas amostras perderam mais polímero durante o processo de lavagem. Na tensão de 500 KPa, é possível observar que há uma melhora no comportamento das curvas das amostras lavadas, as quais se tornam mais lineares.

Para a amostra com 15 ciclos de lavagem é possível observar que apenas na tensão de 1000 KPa ela retorna ao estágio inicial, ponto 0, na resposta piezoresistiva.

Isso sugere que a amostra sofreu histerese mecânica, a qual houve deformação porém não retornando a forma inicial depois da descompressão. Tal comportamento pode ser justificado pela não adesão das partículas de polipirrol sobre a superfície do substrato após sucessivos ciclos de lavagens e durante, soltando-se durante o ensaio. O mesmo não ocorre com as amostras que foram submetidas a 20 e 25 ciclos de lavagens, pois já apresentavam uma quantidade reduzida de polipirrol na sua superfície, sugerindo que somente as partículas mais aderidas permaneceram nas fibras. Observou-se, no entanto, que após a sucessão de ciclos de compressão, a amostra submetida a 15 ciclos de lavagens retornou ao estado esperado e ao comportamento piezoresistivo. Isso se deve ao fato de que a maior pressão exercida possibilitou que as partículas mais aderidas de ambas as camadas da malha ficassem mais próximas melhorando a comportamento em relação aos primeiros ensaios.

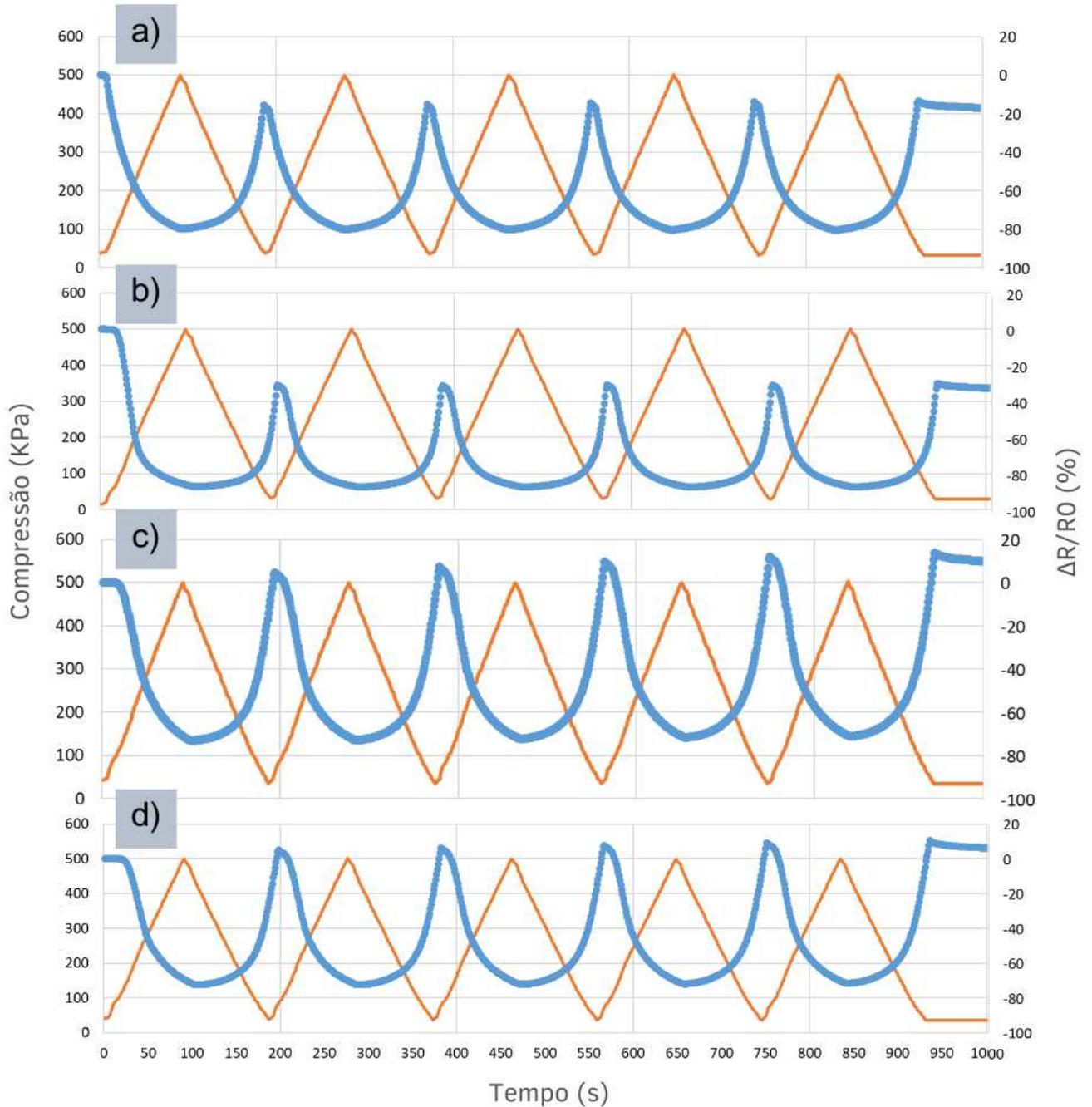
Observou-se também que os vales de $\Delta R/R_0$ (piezorestividade) de todas as amostras se tornaram mais regulares e maiores diante do aumento da tensão, 500 e 1000 KPa, o que possibilitou uma maior distinção dos sinais medidos, sugerindo também a confirmação do comportamento piezoresistivo das amostras revestidas com polipirrol. Tal comportamento também foi observado por Li *et al.* (2020) quando realizou o ensaio em fios de poliuretano revestidos com PPy, o qual obteve curvas semelhantes ao do presente trabalho.

Figura 17 – Resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % (pontos azuis, eixo direito) e tensão de compressão em 250 KPa (linha laranja, eixo esquerdo) em função do tempo de ensaio: a) antes da lavagem, b) após 15x c) após 20x e d) após 25x



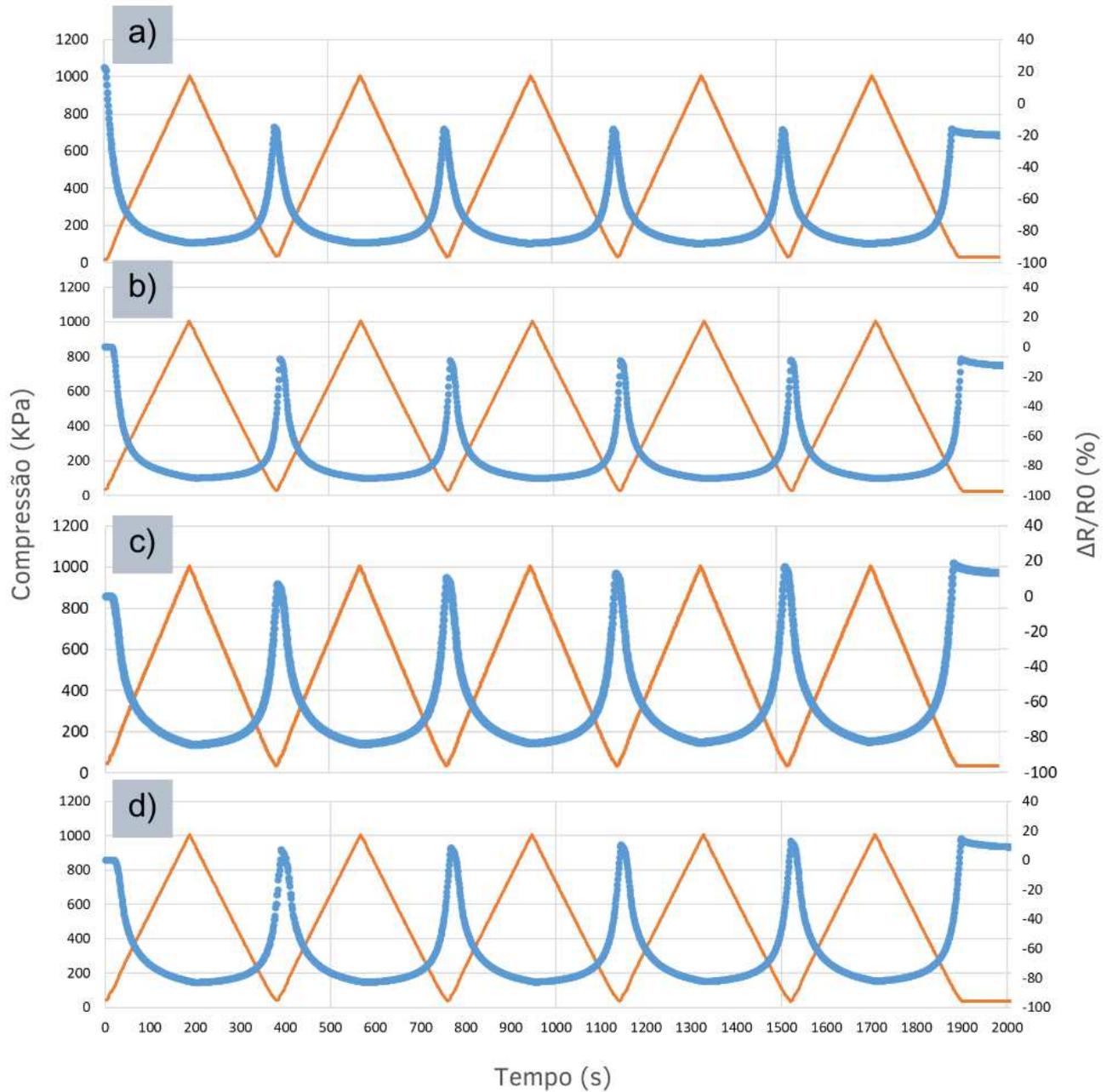
Fonte: Autora

Figura 18 – Resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % (pontos azuis, eixo direito) e tensão de compressão em 500 KPa (linha laranja, eixo esquerdo) em função do tempo de ensaio: a) antes da lavagem, b) após 15x c) após 20x e d) após 25x



Fonte: Autora

Figura 19 – Resposta piezoresistiva ($\Delta R/R_0$) em % (pontos azuis, eixo direito) e tensão de compressão em 1000 KPa (linha laranja, eixo esquerdo) em função do tempo de ensaio: a) antes da lavagem, b) após 15x c) após 20x e d) após 25x



Fonte: Autora

5 CONCLUSÃO

A partir deste trabalho de conclusão de curso, colocou-se em evidência o estudo do comportamento de um material têxtil revestido com polímero condutor frente a usabilidade real e a sua resistência após desgastes comuns ao cotidiano.

Visualmente as amostras foram polimerizadas, devido ao escurecimento das amostras, comportamento esperado por se tratar do PPy. A condutividade elétrica obtida para a malha polimerizada ficou dentro da faixa prevista para o PPy, que é na ordem de 10^{-6} a 10^4 S/cm.

A realização do ensaio de tração demonstrou que as malhas revestidas tiveram redução na deformação quando comparadas as malhas antes do revestimento. O ensaio de abrasão demonstrou uma certa fragilidade superficial das malhas após 10.000 ciclos de abrasão, pelo aparecimento de pequenos furos, porém baixa redução na condutividade elétrica, em uma ordem decimal, quando comparado as amostras sem abrasão.

Verificou-se que mesmo após a realização de 15, 20 e 25 ciclos de lavagem as malhas permaneceram condutoras. Houve uma redução de até duas ordens decimais, mas observou-se uma estabilização entre 20 e 25 ciclos. Também se observou uma pequena perda de massa com o aumento das lavagens, porém chegando a uma estabilização entre 20 e 25 ciclos.

O ensaio de solidez ao suor ácido e álcali demonstrou que as malhas não são afetadas diretamente e mantiveram a condutividade elétrica de antes do ensaio, se mostrando resistentes ao suor.

Confirmou-se o comportamento piezoresistivo das amostras contendo PPy antes e após os ciclos de lavagem, com a realização do ensaio eletromecânico nas tensões de 250, 500 e 1000 KPa. As amostras apresentaram maior uniformidade nos ciclos nas tensões de 500 e 1000 KPa.

Portanto, as malhas *spacer* por trama revestidas com PPy se demonstram como promissoras para o desenvolvimento em *e-textiles* que se utilizem da piezoresistividade como fonte de energia, principalmente considerando a potencialidade da sua durabilidade durante o uso e quando em contato direto ao corpo humano, podendo ser utilizada em aplicações como palmilhas, joelheiras, cotoveleiras ou demais materiais que sofram algum tipo de deformação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados alcançados neste trabalho, foram destacadas as seguintes oportunidades para a continuidade da pesquisa:

- Realizar o potencial zeta das amostras;
- Avaliar a malha quanto a sua permeabilidade do ar antes e após o revestimento;
- Avaliar o comportamento piezoresistivo em um número mais extenso de repetições;
- Avaliar a condutividade elétrica da malha considerando todos os eventos: solidez à lavagem, solidez ao suor e abrasão;
- Avaliar o comportamento piezoresistivo da malha considerando todos os eventos: solidez à lavagem, solidez ao suor e abrasão.

REFERÊNCIAS

- ASAYESH, A.; AMINI, M. The effect of fabric structure on the compression behavior of weft-knitted spacer fabrics for cushioning applications. **The Journal of The Textile Institute**, [s. l.], v. 112, n. 10, p. 1568–1579, 2021.
- BILIR, M.; GÖK, M. The Effect of Perspiring on Conductivity in Electronic Textile Design. **Marmara Fen Bilimleri Dergisi**, [s. l.], 2017.
- CHEN, C. *et al.* Analysis of physical properties and structure design of weft-knitted spacer fabric with high porosity. **Textile Research Journal**, [s. l.], v. 88, n. 1, p. 59–68, 2018.
- CUNHA, A. L. A. da. **Design de um casaco com auto aquecimento baseado em tinta condutora**. 2022. masterThesis[s. l.], 2022. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/77368>.
- 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**, [s. l.], v. 54, p. 15280837241253614, 2024.
- DEOGAONKAR, S. C. Dielectric barrier discharge plasma induced surface modification of polyester/cotton blend fabrics to improve polypyrrole coating adhesion and conductivity. **The Journal of The Textile Institute**, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405000.2019.1710905>.
- GHAHREMANI HONARVAR, M.; LATIFI, M. Overview of wearable electronics and smart textiles. **The Journal of The Textile Institute**, [s. l.], v. 108, n. 4, p. 631–652, 2017.
- GOYAL, M.; SINGH, K.; BHATNAGAR, N. Conductive polymers: A multipurpose material for protecting coating. **Progress in Organic Coatings**, [s. l.], v. 187, p. 108083, 2024.
- GRANCARIĆ, A. M. *et al.* Conductive polymers for smart textile applications. **Journal of Industrial Textiles**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 612–642, 2018.
- GUETHS, C. Desenvolvimento de têxteis condutores a partir de malha spacer por trama. 2023. 64 f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Graduação em Engenharia Têxtil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2023.
- HUMMEL, R. E. Electrical Properties of Polymers, Ceramics, Dielectrics, and Amorphous Materials. *In*: HUMMEL, R. E. (org.). **Electronic Properties of Materials**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. p. 166–193. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-86538-1_9.
- IDUMAH, C. I. Design, fabrication, characterization and properties of metallic and conductive smart polymeric textiles for multifunctional applications. **Nano-Structures & Nano-Objects**, [s. l.], v. 35, p. 100982, 2023.

JÚNIOR, H. L. O. *et al.* Smart Fabric Textiles: Recent Advances and Challenges. **Textiles**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 582–605, 2022.

LE, T.-H.; KIM, Y.; YOON, H. Electrical and Electrochemical Properties of Conducting Polymers. **Polymers**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 150, 2017.

LI, T. *et al.* Study on electromechanical property of polypyrrole-coated strain sensors based on polyurethane and its hybrid covered yarns. **Sensors and Actuators A: Physical**, [s. l.], v. 306, p. 111958, 2020.

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

MAESTRI, G. *et al.* Development of a textile multilayered device with piezoelectric property using different knitted fabric structures. **CoLab**, [s. l.], 2023a. Disponível em: <https://colab.ws/articles/10.1108%2Frjta-04-2023-0047>.

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

MATTANA, GIORGIO. **Realisation and Characterisation of Organic Electronic Devices for E-textiles applications**. [S. l.: s. n.], 2011. Disponível em: http://veprints.unica.it/607/1/TesiDottorato_GiorgioMattana.pdf.

MEENA, J. S. *et al.* Electronic textiles: New age of wearable technology for healthcare and fitness solutions. **Materials Today Bio**, [s. l.], v. 19, p. 100565, 2023.

MERLINI, C. *et al.* Polypyrrole nanoparticles coated amorphous short silica fibers: Synthesis and characterization. **Polymer Testing**, [s. l.], v. 31, n. 8, p. 971–977, 2012.

MUNRO, B. J. *et al.* The intelligent knee sleeve: A wearable biofeedback device. **Sensors and Actuators B: Chemical**, [s. l.], v. 131, n. 2, p. 541–547, 2008.

PARADISO, R.; CALDANI, L.; PACELLI, M. Chapter 3.1 - Knitted Electronic Textiles. *In*: SAZONOV, E.; NEUMAN, M. R. (org.). **Wearable Sensors**. Oxford: Academic Press, 2014. p. 153–174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124186620000039>.

RYAN, K. R. *et al.* Additive manufacturing (3D printing) of electrically conductive polymers and polymer nanocomposites and their applications. **eScience**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 365–381, 2022.

STEELE, J. R. **The Bionic Bra: Using electromaterials to sense and modify breast support to enhance active living - Julie R Steele, Sheridan A Gho, Toni E Campbell, Christopher J Richards, Stephen Beirne, Geoffrey M Spinks, Gordon G Wallace, 2018.** [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/2055668318775905>.

STOPPA, M.; CHIOLERIO, A. Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review. **Sensors**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 11957–11992, 2014.

TSEGHAJ, G. B. *et al.* Integration of Conductive Materials with Textile Structures, an Overview. **Sensors**, [s. l.], v. 20, n. 23, p. 6910, 2020.

WU, J. X.; LI, L. An introduction to wearable technology and smart textiles and apparel: Terminology, statistics, evolution, and challenges. *In*: SMART AND FUNCTIONAL SOFT MATERIALS. [S. l.]: IntechOpen, 2019.

YILDIZ, Z.; USTA, I.; GUNGOR, A. Electrical properties and electromagnetic shielding effectiveness of polyester yarns with polypyrrole deposition. **Textile Research Journal**, [s. l.], v. 82, n. 20, p. 2137–2148, 2012.

YIP, J.; NG, S.-P. Study of three-dimensional spacer fabrics:: Physical and mechanical properties. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 206, n. 1, p. 359–364, 2008.

ZHANG, L.; BAIMA, M.; ANDREW, T. L. Transforming Commercial Textiles and Threads into Sewable and Weavable Electric Heaters. **ACS Applied Materials & Interfaces**, [s. l.], v. 9, n. 37, p. 32299–32307, 2017.

ZHOU, X. *et al.* Polyaniline-coated cotton knitted fabric for body motion monitoring. **Sensors and Actuators A: Physical**, [s. l.], v. 321, p. 112591, 2021.

ZOU, L. *et al.* The optimization of nanocomposite coating with polyaniline coated carbon nanotubes on fabrics for exceptional electromagnetic interference shielding. **Diamond and Related Materials**, [s. l.], v. 104, p. 107757, 2020.