



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

Ludimilla Barbosa Ferreira

**Estudo do comportamento de malhas de algodão e viscose funcionalizadas com polipirrol**

Blumenau  
2024

Ludimilla Barbosa Ferreira

**Estudo do comportamento de malhas de algodão e viscose funcionalizadas com polipirrol**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Têxtil  
Orientador: Profa. Dra. Fernanda Steffens  
Coorientador: Profa. Dra. Claudia Merlini

Blumenau  
2024

### Ficha de identificação da obra

Ferreira, Ludimilla Barbosa  
Estudo do comportamento de malhas de algodão e viscose  
funcionalizadas com polipirrol / Ludimilla Barbosa  
Ferreira ; orientadora, Fernanda Steffens, coorientador,  
Claudia Merlini, 2024.  
91 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Têxtil, Blumenau, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Têxteis inteligentes. 3.  
Eletrônicos vestíveis. 4. Condutividade. I. Steffens,  
Fernanda . II. Merlini, Claudia. III. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Têxtil. IV. Título.

Ludimilla Barbosa Ferreira

**Título: Estudo do comportamento de malhas de algodão e viscose  
funcionalizadas com polipirrol**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 10 de junho de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Andrea Cristiane Krause Bierhalz, Dr.(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Guilherme Mariz de Oliveira Barra, Dr.(a)  
Universidade Federal de Santa Catarina

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

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

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

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

Blumenau, 2024

Este trabalho é dedicado à minha família, amigos e a todos os profissionais apaixonados pelo fantástico mundo dos têxteis.

## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio, incentivo e colaboração de várias pessoas, às quais gostaria de expressar minha mais profunda gratidão.

Minha gratidão à UFSC, pela oportunidade e apoio prestado, durante esses anos de mestrado.

Não posso deixar de mencionar minha família, cujo amor e apoio incondicional foram essenciais durante todo o processo. Aos meus pais, Fátima e José Antonio e meus irmãos Lucas e Samara, por acreditarem em mim e me proporcionarem todas as oportunidades para alcançar meus objetivos.

Ao meu noivo, Leonardo, por seu carinho, paciência e compreensão nos momentos mais desafiadores, pelos conselhos e por nunca soltar a minha mão

Gostaria de agradecer às minhas orientadoras, Fernanda e Cláudia, pela orientação, paciência e pela confiança depositada em mim ao longo desta jornada. A troca de conhecimento, dedicação, conselhos e compreensão, foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Prof<sup>a</sup> Andrea e Prof<sup>o</sup> Guilherme, por suas valiosas sugestões e críticas construtivas, que contribuíram significativamente para o aprimoramento deste trabalho.

Sou imensamente grata também aos meus colegas e amigos de mestrado, especialmente Marcos, Isadora, Rodrigo, Thais, Aline que compartilharam comigo momentos de dúvida e de descoberta, oferecendo sempre apoio e companheirismo.

E, por fim, aos alunos da graduação Pedro, Camila e Lissa, que foram essenciais nos momentos que não pude estar presente, a colaboração, empenho, discussões e contribuição de vocês foram muito importantes para a construção desse trabalho, por isso serei eternamente grata.



*“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento.”*

(Albert Einstein)



## RESUMO

Os têxteis inteligentes surgiram com o objetivo de agregar novas funcionalidades aos substratos fibrosos, respondendo a estímulos externos. Dentre esses têxteis, destacam-se os e-textéis, que têm sido amplamente investigados devido à crescente demanda por eletrônicos portáteis de baixo custo, sendo potenciais componentes em dispositivos wearable. Uma das principais metas de desenvolvimento desses dispositivos é a miniaturização das baterias, permitindo a fabricação de produtos cada vez mais compactos e portáteis. Para o desenvolvimento de têxteis eletrônicos, é necessário incorporar aos substratos fibrosos materiais com propriedades elétricas, como os polímeros condutores. Estes são materiais orgânicos que possuem cadeias conjugadas, permitindo o fluxo livre de polarons e criando um caminho condutivo. Entre os polímeros condutores, o polipirrol se destaca por sua fácil processabilidade, tornando-se um potencial agente condutor para dispositivos eletrônicos e sensores. O objetivo desta dissertação de mestrado é estudar o comportamento de condutividade elétrica de malhas de raporte jersey e rib de algodão e viscose revestidas com polipirrol. Foi realizada a polimerização *in situ* do polipirrol em todas as estruturas de malhas (jersey e rib, algodão e viscose), utilizando diferentes proporções e tempos. A partir das análises visuais, de ganho de massa e de condutividade, verificou-se que as amostras de jersey de algodão e rib de viscose, com molaridade de 0,08 mol/L polimerizadas por 60 minutos, apresentaram os maiores valores de condutividade. As malhas condutoras selecionadas foram caracterizadas quimicamente via FTIR e morfologicamente, além de serem realizadas análises de resistividade para medir o potencial condutivo das diferentes concentrações utilizadas. Na análise de FTIR, observou-se a presença de bandas características da celulose e da celulose regenerada, e, após a adição do polímero condutor, houve uma sobreposição associada ao revestimento eficiente do polímero condutor sobre o substrato têxtil. A análise térmica revelou mudanças estruturais nas malhas de algodão, mostrando um comportamento similar entre as malhas antes e depois da funcionalização. O ensaio de tração mostrou pouca redução na resistência à ruptura, mas evidenciou um aumento da rigidez devido à polimerização com o polipirrol. Além disso, foi realizada a análise a partir de ciclos de lavagem, simulando a utilização das malhas condutoras em um eletrônico vestível, para medir possíveis alterações na condutividade. Mesmo após múltiplos ciclos de lavagem (1x, 5x e 10x), a condutividade manteve-se na mesma ordem de grandeza, indicando a durabilidade do revestimento. Esses resultados são promissores para a aplicação em têxteis inteligentes, como sensores biomédicos, dispositivos vestíveis e outras tecnologias inovadoras, incentivando estudos futuros para aprimorar a condutividade e estabilidade desses materiais.

**Palavras-chave:** Têxteis inteligentes. Eletrônicos vestíveis. E-têxteis. Condutividade.

## ABSTRACT

Smart textiles emerged with the aim of adding new functionalities to fibrous substrates, responding to external stimuli. Among these textiles, e-textiles stand out, having been extensively investigated due to the growing demand for low-cost portable electronics, making them potential components in wearable devices. One of the main goals in developing these devices is the miniaturization of batteries, enabling the manufacture of increasingly compact and portable products. For the development of electronic textiles, it is necessary to incorporate materials with electrical properties, such as conductive polymers, into the fibrous substrates. These are organic materials with conjugated chains, allowing the free flow of polarons and creating a conductive path. Among conductive polymers, polypyrrole stands out for its easy processability, making it a potential conductive agent for electronic devices and sensors. The objective of this work is to study the electrical conductivity behavior of jersey and rib knitted fabrics made of cotton and viscose coated with polypyrrole. The in situ polymerization of polypyrrole was carried out on the aforementioned knitted fabrics structures using different concentrations and times. From visual analyses, mass gain, and electrical conductivity, it was found that the cotton jersey and viscose rib samples, with a molarity of 0.08 mol/L polymerized for 60 minutes, presented the highest conductivity values. The selected conductive fabrics were chemically characterized via FTIR and morphologically analyzed, in addition to performing resistivity analyses to measure the conductive potential of the different concentrations used. In the FTIR analysis, the presence of characteristic bands of cellulose and regenerated cellulose was observed, and after the addition of the conductive polymer, there was an overlapping associated with the coating of the conductive polymer on the textile substrate. Thermal analysis revealed structural changes in the cotton fabrics, showing similar behavior between the fabrics before and after functionalization. The tensile test showed little reduction in breaking strength but evidenced an increase in stiffness due to the polypyrrole polymerization. Additionally, fastness test was performed in different washing cycles (1x, 5x, and 10x), simulating the use of conductive fabrics in a wearable, to measure possible changes in conductivity. After multiple washing cycles, the conductivity remained in the same order of magnitude, indicating the durability of the coating. These results are promising for application in smart textiles, such as biomedical sensors, wearable devices, and other innovative technologies, encouraging future studies to improve the conductivity and stability of these materials.

**Keywords:** Smart textile. Wearable. E-textile. Conductivity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das fibras .....	23
Figura 2 – Propriedades do algodão .....	24
Figura 3 – Estrutura molecular da celulose - Algodão .....	25
Figura 4 – Processo de obtenção de fibras de viscose.....	26
Figura 5 – Estrutura molecular da celulose regenerada - viscose.....	26
Figura 6 – Estrutura de (a) malha por trama e (b) malha por urdume.....	27
Figura 7 – Classificação dos têxteis inteligentes .....	33
Figura 8 – Estrutura de um PICs com ligações conjugadas .....	35
Figura 9 – Comparativo entre condutividade elétrica dos polímeros e outros materiais .....	36
Figura 10 – Mecanismo polimerização do Polipirrol .....	40
Figura 11 – Etapa 1: Caracterização das malhas .....	43
Figura 12 – Etapa 2: Obtenção das malhas condutoras através da polimerização oxidativa <i>in situ</i> do pirrol .....	43
Figura 13 – Etapa 3: Caracterização das malhas condutoras.....	44
Figura 14 – Etapa 4: Avaliação da condutividade após a lavagem das malhas funcionalizadas .....	44
Figura 15 – Fluxograma com as etapas de obtenção da malha condutora .....	48
Figura 16 – Comprimento de laçada e título do fio.....	52
Figura 17 – Ganho de massa das malhas revestidas com PPy – 30 minutos.....	54
Figura 18 – Ganho de massa das malhas revestidas com PPy – 60 minutos.....	54
Figura 19 – Relação entre massa e condutividade das malhas de CO e CV .....	56
Figura 20 – MEV da estrutura jersey CO: antes (a) e b) e após a funcionalização (c) e (d) CO/PPy <sub>[0,08]</sub> – 60 minutos.....	57
Figura 21 – MEV da estrutura jersey CV: antes (a) e b) e após a funcionalização (c) e (d) CV/PPy <sub>[0,08]</sub> – 60 minutos.....	58
Figura 22 – MEV da estrutura rib CO: antes (a) e b) e após a funcionalização (c) e (d) CO/PPy <sub>[0,08]</sub> – 60 minutos.....	59
Figura 23 – MEV da estrutura rib CV: antes (a) e b) e após a funcionalização (c) e (d) CV/PPy <sub>[0,08]</sub> – 60 minutos .....	60
Figura 24 – FTIR da malha de CO antes e após polimerização .....	62
Figura 25 – FTIR da malha de CV antes e após polimerização .....	64
Figura 26 – Comportamento de tração da malha jersey de CO antes e após polimerização....	66
Figura 27 – Ensaio de tração malha de rib CV antes e após polimerização.....	67

Figura 28 – DSC da malha jersey de CO antes e após polimerização.....	68
Figura 29 – DSC da malha de rib CV antes e após polimerização.....	69
Figura 30 – Comportamento da malha jersey CO/PPy <sub>[0,08]</sub> antes e após diferentes ciclos de lavagem.....	71
Figura 31 – Comportamento da malha rib CV/PPy <sub>[0,08]</sub> antes e após diferentes ciclos de lavagem .....	71
Figura 32 – MEV da malha jersey CO/PPy <sub>[0,08]</sub> após ciclos de lavagem: a) e b) 1X; c) e d) 5X; e) e f) 10X.....	73
Figura 33 – MEV da malha rib CV/PPy <sub>[0,08]</sub> após ciclos de lavagem: a) e b) 1X; c) e d) 5X; e) e f) 10X.....	74
Figura 34 – FTIR da malha de CO revestida com PPy antes e após ciclos de lavagem .....	75
Figura 35 – FTIR da malha de CV revestida com PPy antes e após ciclos de lavagem .....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre malha por trama e por urdume.....	28
Tabela 2 – Relação estímulo versus resposta dos têxteis inteligentes.....	32
Tabela 3 – Estruturas dos principais polímeros intrinsecamente condutores.....	37
Tabela 4 – Condições utilizadas para polimerização da malha condutora com PPy.....	47
Tabela 5 – Condições ensaio de lavagens das malhas condutoras .....	50
Tabela 6 – Parâmetros estruturais das malhas .....	53
Tabela 7 – Análise de condutividade de 4 pontas das malhas revestidas com PPy .....	55
Tabela 8 – Número de onda FTIR da malha rib de CV e CV/PPy <sub>[0,08]</sub> .....	63
Tabela 9 – Número de onda FTIR da malha rib de CV e CV/PPy <sub>[0,08]</sub> .....	64
Tabela 10 – Valores obtidas do ensaio de tração das amostras de jersey de CO e rib de CV antes e após a funcionalização .....	65
Tabela 11 – Resultados ensaio de tração da malha de CO antes e após ciclos de lavagem .....	76
Tabela 12 – Resultados ensaio de tração da malha de CV antes e após ciclos de lavagem .....	78
Tabela 13 – Análise de condutividade da malha jersey CO/PPy <sub>[0,08]</sub> antes e após diferentes ciclos de lavagem.....	79
Tabela 14 – Análise de condutividade da malha rib CV/PPy <sub>[0,08]</sub> antes e após ciclos de lavagem .....	80



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CO – Algodão

CV – Viscose

FeCl<sub>3</sub> – Cloreto de Ferro

NT – Nãotecido

PANI – Polianilina

PCL – Poli(caprolactona)

PEDOT – Poli(3,4-etilenodioxitiofeno)

PIC – Polímeros intrinsecamente condutores

PPy – Polipirrol

PTh – Politiofeno

TPU – Poliuretano termoplástico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS .....	21
1.1.1	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>21</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>22</b>
2.1	FIBRAS .....	22
2.2	ESTRUTURAS TÊXTEIS .....	27
2.2.1	<b>Tecnologia de malharia .....</b>	<b>27</b>
2.2.2	<b>Malharia por trama.....</b>	<b>27</b>
2.3	TÊXTEIS INTELIGENTES .....	29
2.4	POLÍMEROS INTRINSICAMENTE Condutores.....	34
2.4.1	<b>Polipirrol.....</b>	<b>39</b>
2.5	PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO .....	41
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
3.1	MATERIAIS.....	42
3.2	METODOLOGIA.....	42
3.2.1	<b>Etapa 1 – Caracterização das malhas .....</b>	<b>44</b>
3.2.2	<b>Etapa 2 – Obtenção da malha condutora .....</b>	<b>47</b>
3.2.3	<b>Etapa 3 – Caracterização das malhas condutoras .....</b>	<b>49</b>
3.2.4	<b>Etapa 4 – Processo de lavagem das malhas .....</b>	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>51</b>
4.1	Caracterização das malhas .....	51
4.2	Caracterização das malhas recobertas com ppy.....	53
4.2.1	<b>Avaliação do revestimento .....</b>	<b>53</b>
4.2.2	<b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</b>	<b>57</b>
4.2.3	<b>Ensaio de condutividade de 4 pontas .....</b>	<b>55</b>
4.2.4	<b>Espectroscopia infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....</b>	<b>60</b>
4.2.5	<b>Ensaio de tração das malhas antes e após a polimerização com PPy .....</b>	<b>65</b>
4.2.6	<b>Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) .....</b>	<b>67</b>

4.3	Lavagem das malhas funcionalizadas com PPy .....	70
4.3.1	<b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV) após ciclos de lavagem .....</b>	<b>72</b>
4.3.2	<b>Espectroscopia infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) após ciclos de lavagem.....</b>	<b>75</b>
4.3.3	<b>Ensaio de tração das amostras após ciclos de lavagem .....</b>	<b>76</b>
4.3.4	<b>Ensaio de condutividade após ciclos de lavagem .....</b>	<b>79</b>
5	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>82</b>
6	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>83</b>
7	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os têxteis inteligentes são definidos como dispositivos que apresentam uma resposta a um estímulo externo, podendo também se adaptar ao ambiente circundante. Esses materiais podem envolver os sentidos – olfativo, visual, auditivo e tátil –, e converter estímulos do ambiente como temperatura, luz, umidade e pH ou interações como resistência mecânica e eletromagnética em reações químicas ou físicas mudando as estruturas e estados dos materiais constituintes (Ruckdashel; Khadse; Park, 2022).

De acordo com Chen et al. (2020), essa classe de materiais surgiu com o intuito de trazer funcionalidades não oferecidas em têxteis tradicionais. Dentre as tecnologias inteligentes pode-se citar os têxteis eletrônicos que vêm sendo desenvolvidos devido à necessidade de miniaturização das baterias. Zhang et al. (2021) descrevem em seu estudo que os maiores desafios para o desenvolvimento de têxteis eletrônicos estão na busca de utilizar energia renovável associado ao baixo custo e em dispositivos portáteis. Além disso, esses materiais não devem apresentar risco ao meio ambiente e não depender de recursos energéticos limitados.

Diversas classes de têxteis podem ser utilizadas para desenvolver dispositivos inteligentes. Dentre essas, destacam-se as malhas, que por serem compostas por laçadas, apresentam maior deformação e oferecem conforto ao usuário devido a sua flexibilidade. As malhas podem ser classificadas de acordo com a direção que são produzidas as suas laçadas: malharia por trama e malharia por urdume. As malhas por trama podem apresentar diversas estruturas de acordo com a geometria das suas laçadas. Alguns exemplos de raporte da malha por trama são o jersey e o rib que são amplamente utilizadas na confecção de vestuário, principalmente esportivo. O jersey é uma malha lisa, conhecida por seu conforto e elasticidade. O rib é uma malha que apresenta aspecto canelado, caracterizada por suas linhas verticais, que são criadas pela alternância de pontos voltados para o direito e avesso técnico. Essa estrutura proporciona maior elasticidade e capacidade de recuperação, especialmente na largura. Ambos são têxteis muito utilizados atualmente pelo conforto e moldagem ao corpo que proporcionam, por esse motivo a construção de têxteis eletrônicos a partir de malhas condutoras, demonstra-se muito interessante devido às diversas propriedades já mencionadas.

Entretanto, com o avanço da tecnologia, tem se verificado ao longo dos anos que os têxteis deixaram de atuar como um suporte para o desenvolvimento de eletrônicos e passaram a efetivamente serem os dispositivos com propriedades elétricas (Ruckdashel; Khadse; Park, 2022).

Os polímeros condutores possuem papel importante no desenvolvimento dos têxteis eletrônicos, podendo atuar como resistores, capacitores e interconexões com outros materiais e dispositivos inteligentes (Ruckdashel; Khadse; Park, 2022). São materiais orgânicos que possuem cadeias com ligações simples ou duplas permitindo o fluxo de elétrons (Medeiros et al., 2012a). A inserção desses polímeros em materiais têxteis pode ser realizada através de processos complexos, como o desenvolvimento de fibras e fios com propriedades eletrônicas, ou pela funcionalização superficial dos substratos por meio de polimerização *in situ* (Stoppa; Chiolerio, 2014; Wu; Mechael; Carmichael, 2021). Na literatura pouco tem se encontrado sobre o estudo da funcionalização de malhas comerciais com polímeros intrinsecamente condutores (PICs). Por isso, a investigação torna-se interessante para o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos vestíveis a partir de malhas condutoras.

Diante de todo o exposto, o objetivo deste trabalho é o estudo do comportamento das malhas de estruturas jersey e rib, compostas por diferentes matérias-primas (algodão e viscose) a partir da polimerização *in situ* do pirrol na superfície. O polipirrol é um polímero condutor muito estudado e promissor para o desenvolvimento de eletrônicos, inclusive eletrônicos vestíveis, devido a sua elevada resistência mecânica e elasticidade e à sua elevada estabilidade. Além disso, é de fácil processabilidade e obtenção e, dentre os polímeros condutores, apresenta uma das maiores condutividades (Hao et al., 2022). O comportamento da malha condutora desenvolvida foi analisado do ponto de vista de sua condutividade elétrica, resistência mecânica e interação entre substrato e polímero condutor. Posteriormente, foi realizado diferentes ciclos de lavagem no qual avaliou-se a influência nas propriedades físico-químicas, mecânicas, morfológicas e de condutividade elétrica.

O desenvolvimento de têxteis inteligentes, com aplicações potenciais em sensores biomédicos, dispositivos vestíveis e outras tecnologias inovadoras, incentivam estudos para aprimorar ainda mais a condutividade aliada ao conforto e demais propriedades que as malhas possam oferecer. A pesquisa aprofundada nesse campo não apenas explora novas metodologias de integração e aplicação desses polímeros, mas também abre caminhos para o desenvolvimento de produtos inteligentes e de alto desempenho.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação de mestrado é investigar o tratamento superficial das malhas de algodão e viscose com PPy, analisando sua condutividade elétrica, visando a sua aplicabilidade nas áreas de sensoriamento, baterias e *wearable*.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar o efeito da concentração e do tempo de reação na polimerização in situ do polipirrol em malhas de algodão e viscose.
- Avaliar a eficiência do revestimento das malhas com polipirrol e observar a distribuição e a estrutura do polímero condutor na malha, a partir da análise de parâmetros estruturais e de técnicas analíticas físico-químicas e morfológicas, como espectroscopia de infravermelho (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).
- Avaliar e determinar as propriedades mecânicas das malhas antes e após polimerização e verificar seu comportamento após múltiplos ciclos de lavagem, a partir do ensaio de tração.
- Avaliar a interação entre o polímero condutor e a malhas de algodão e viscose e verificar o comportamento térmico após a funcionalização por meio da caracterização térmica calorimetria diferencial de varredura (DSC).
- Avaliar a condutividade elétrica das malhas funcionalizadas a partir de diferentes ciclos de lavagem.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será discutida a fundamentação teórica utilizada para a construção desta dissertação de mestrado. Inicialmente, serão abordadas as fibras, estruturas têxteis, materiais inteligentes, suas propriedades e tecnologias associadas. Em seguida são expostos os conceitos de condutividade, polímeros condutores, seus efeitos e mecanismos e por fim os têxteis inteligentes com propriedade condutoras e aplicações.

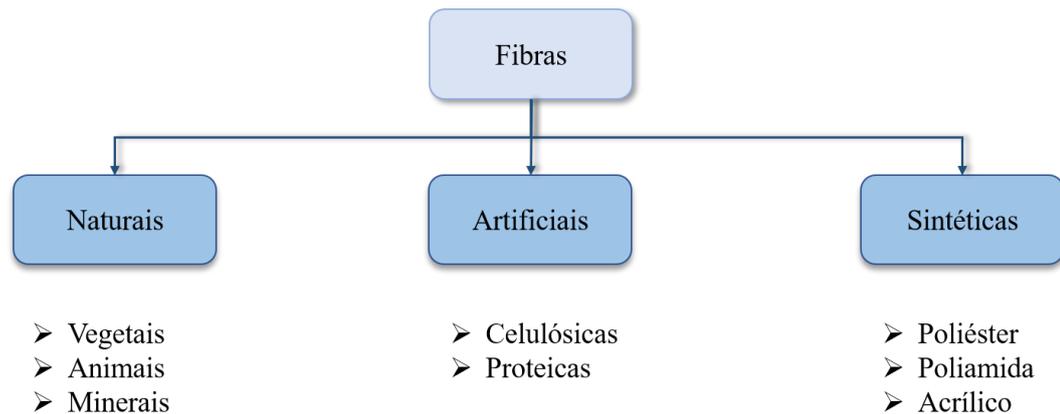
### 2.1 FIBRAS

As fibras são utilizadas desde a pré-história com o homem confeccionando o próprio vestuário a partir de ramos, folhas e outros materiais disponíveis à época. Com o avanço da tecnologia há uma constante demanda por produtos que utilizem fibras com propriedades específicas de acordo com o desejo do consumidor final. Dessa forma, a indústria investe na modernização dos processos buscando unir a utilização das diversas fibras com tecnologia de ponta desenvolvendo artigos diferenciados que atendam diversos públicos (Shi et al., 2019).

As fibras são a unidade básica que constitui um artigo têxtil e apresentam elevada razão de aspecto (relação entre o seu comprimento e diâmetro ou seção transversal).

Fibras são utilizadas para projetar e desenvolver estruturas a partir dos processos de tecelagem, malharia e não tecidos (Shi et al., 2019). As fibras podem ser encontradas em diversos formatos e tamanhos, com comprimentos limitados até ilimitados, como os filamentos, e podem ser classificadas como naturais, artificiais e sintéticas, conforme o seu método de obtenção (Figura 1). Além disso, as fibras naturais, principalmente de origem animal, possuem estrutura pilosa, apresentam em muitos casos rugosidade na sua superfície e características como brilho e toque, que são dependentes diretos da superfície dessas estruturas (Immich et al., 2022).

Figura 1 – Classificação das fibras



Fonte: Próprio autor

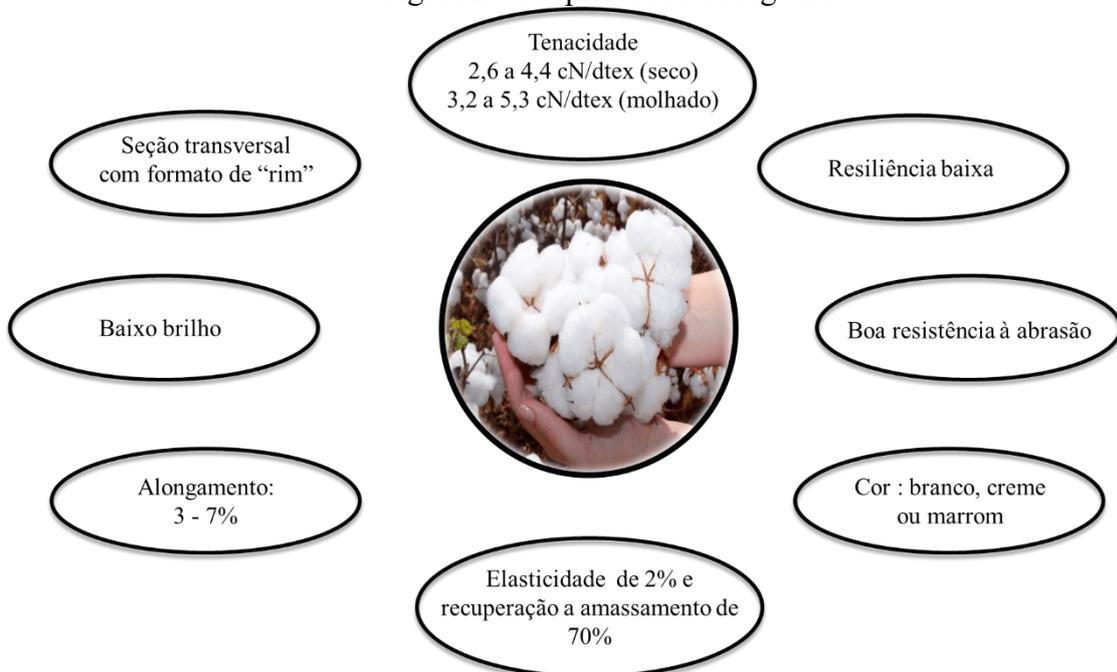
A classificação das fibras se dá de acordo com a origem e extração dos substratos. Tratando-se de fibras naturais, suas características dependem de aspectos como solo e região (origem vegetal), e espécie de animal. Fibras vegetais possuem a celulose como o principal composto e são derivadas de sementes, caule e folhas. Os substratos fibrosos também podem apresentar origem proteica, pois sua obtenção pode se dar a partir de secreções glandulares, como o fio de seda ou provenientes de pelagens, como a lã, por exemplo. As fibras artificiais são desenvolvidas por processos químicos a partir da dissolução dos polímeros provenientes elementos da natureza, como a celulose oriunda principalmente da polpa da madeira, ou a partir de proteínas como a caseína separada do leite, dentre outras origens (Immich et al., 2022).

As fibras sintéticas foram desenvolvidas para trazer propriedades mecânicas e características mais aprimoradas que nas estruturas fibrosas de origem natural. São obtidas a partir de polímeros sintéticos e, em sua grande maioria, derivados de petróleo. É também, considerada *commoditie*, ou seja, uma matéria-prima produzida em larga escala com o custo relativamente baixo podendo ser utilizada na produção de diversos bens industrializados. Desse modo, torna-se uma classe de fibra popular devido a sua elevada demanda, fácil processabilidade e custo inferior, se comparado às fibras de algodão e viscose, por exemplo. O processo de fabricação dessas fibras é puramente químico no qual envolve diversas etapas a partir da transformação do petróleo. Com o passar dos anos, a elevada demanda industrial e a produção de polímeros fizeram com que o produto final produzido a partir de fibra sintética, começasse a se tornar uma ameaça para a natureza devido a seu descarte indevido. (Cesa; Turra; Baruque-Ramos, 2017; Dris et al., 2016; Rebelein et al., 2021).

Dentre as classes de fibras naturais, pode-se destacar a fibra de algodão que surgiu por volta do século XVIII e se popularizou sendo uma das matérias-primas mais utilizadas na

indústria têxtil mundial. Atualmente, o consumo dessa fibra representa cerca de 36 % da indústria têxtil global (Lugoloobi; Memon, 2020). Trata-se de uma matéria-prima natural extraída do algodoeiro e encontrada em várias regiões do Brasil e do mundo. Possui a celulose como composto mais abundante em sua composição, que representa entre 88 e 96,5 %. O comprimento da fibra de algodão depende da espécie da planta, do solo, região, relevo e clima em que é cultivada. Essa matéria-prima se destaca pela sua versatilidade podendo ser utilizada em diversos segmentos, desde artigos de vestuário, têxtil-lar, arquitetura até aplicações industriais (Immich et al., 2022). Na Figura 2 são apresentadas as principais propriedades das fibras de algodão.

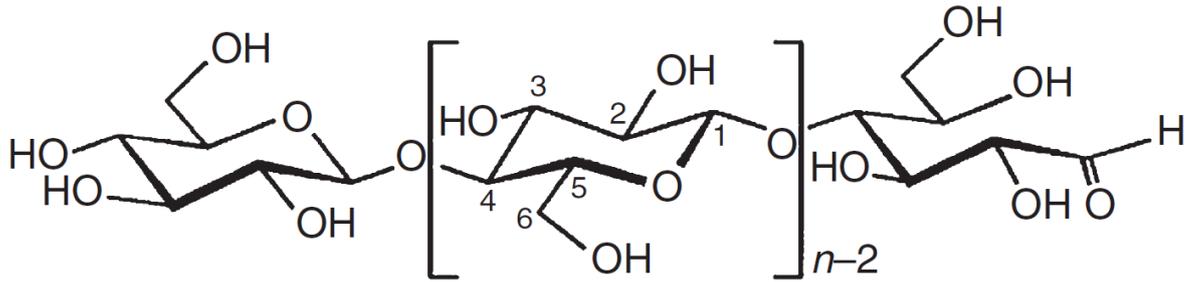
Figura 2 – Propriedades do algodão



Fonte: Próprio autor

A fibra de celulose é um polímero natural composto por unidades repetidas de glicose ligadas por ligações glicosídicas, formando longas cadeias lineares que se organizam em fibras com alta cristalinidade conforme apresentado na Figura 3. Essa estrutura confere à celulose alta resistência mecânica e insolubilidade em água e na maioria dos solventes orgânicos.

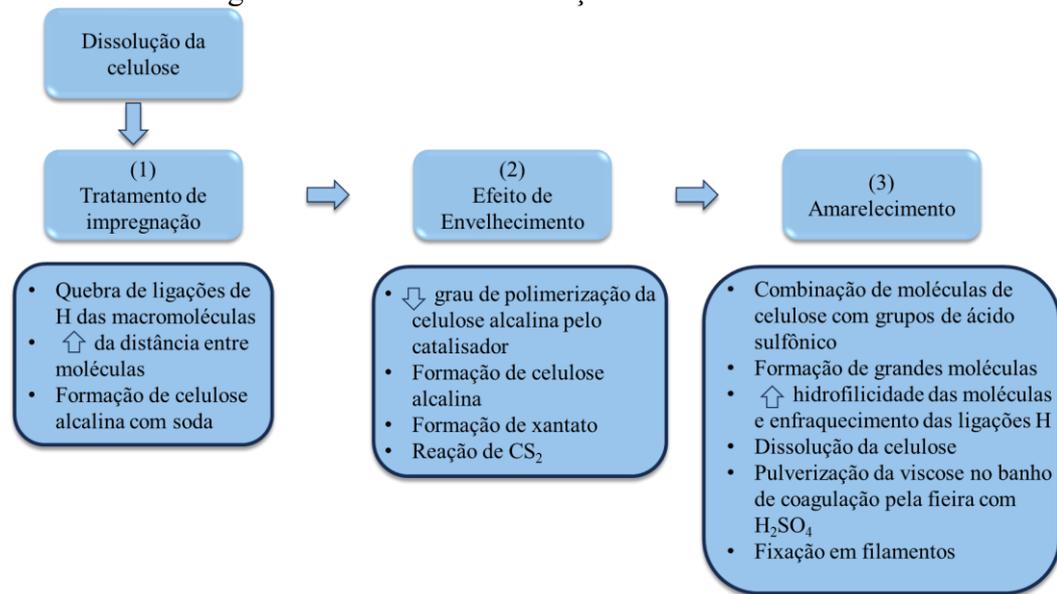
Figura 3 – Estrutura molecular da celulose - Algodão



Fonte: Adaptado de (Matyjaszewski; Möller, 2013)

As fibras artificiais têm representado, atualmente, uma grande parte do mercado mundial. Porém, devido a sua produção agressiva ao ambiente, é importante a adoção de tecnologias de produção mais limpas e sustentáveis reduzindo os impactos negativos no meio ambiente (Guo et al., 2021). A fibra de viscose, descoberta em 1891, trata-se de uma fibra artificial regenerada a partir da celulose proveniente de solução de matérias-primas vegetais como línter de algodão, bambu ou madeira. Essa fibra pode ser obtida principalmente pelo processo de fiação a úmido e se destaca por apresentar elevada absorção de umidade, oferecer um substrato têxtil mais macio ao toque se comparado ao algodão e também mais respirável (Rehan et al., 2018). Apesar de passar por inúmeros processamentos até chegar ao formato de fibra, conforme apresentado na Figura 4, a viscose é uma fibra biodegradável, e se comparada às fibras sintéticas como o poliéster, o impacto ambiental pode variar de acordo com a produção, emissão de gases de efeito estufa e químicos utilizados. Além disso, também é uma fibra versátil, podendo ser utilizada isolada ou em mistura com outras fibras, como o algodão, proporcionando ao substrato têxtil formado maior hidrofiliidade, redução do amassamento, maior maciez, maior flexibilidade (melhor caimento).

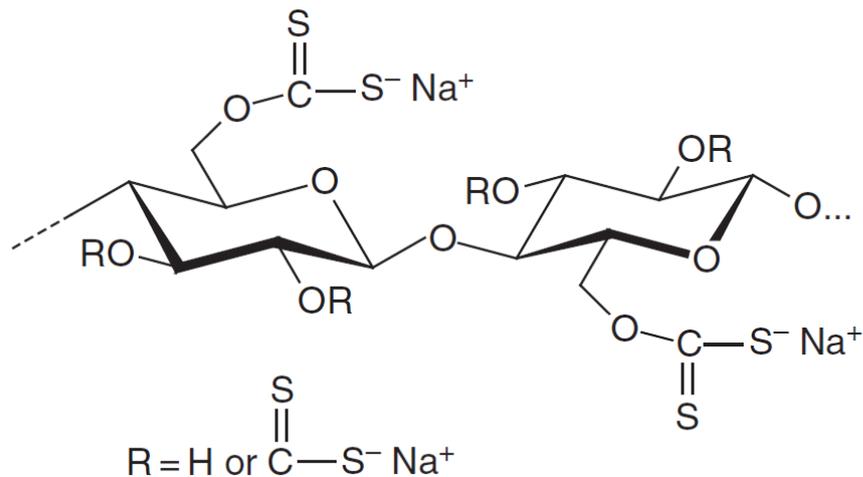
Figura 4 – Processo de obtenção de fibras de viscose



Fonte: Próprio autor

Diferentemente da celulose, a celulose regenerada, passa por um processo químico onde a celulose é dissolvida e depois precipitada, resultando em uma alteração da estrutura molecular, conforme apresentada na Figura 5. Durante a regeneração, as cadeias de celulose se reorganizam com menor cristalinidade e alterações na conformação molecular, o que aumenta a sua solubilidade e modifica suas propriedades físicas, tornando-a mais flexível e menos resistente comparada à celulose natural.

Figura 5 – Estrutura molecular da celulose regenerada - viscose



Fonte: Adaptado de (Matyjaszewski; Möller, 2013)

## 2.2 ESTRUTURAS TÊXTEIS

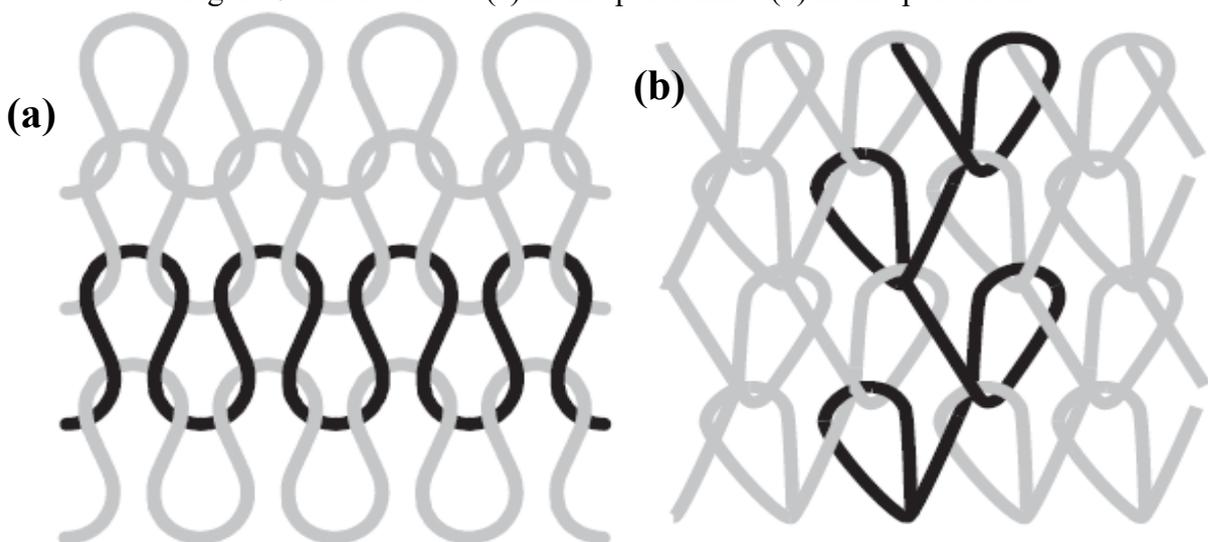
### 2.2.1 Tecnologia de malharia

Os tecidos de malha são populares devido à elevada flexibilidade que apresentam e isso se dá pela formação da laçada que compõe o tecido, o que proporciona conforto devido a sua capacidade de moldar-se ao corpo, quando na forma de vestuário (Zhang; Ma, 2018). Além da evolução na matéria-prima, é necessário o constante avanço nas tecnologias que envolvem a produção a partir desses substratos fibrosos. Hasani et al. (2017), por exemplo, descrevem em sua pesquisa a evolução dos teares para desenvolvimento e produção de malhas, fornecendo a possibilidade de criação de diferentes configurações e estruturas de acordo com o artigo a ser produzido e necessidade do usuário. Os autores ainda apresentam o desenvolvimento de diversos tipos de materiais e estruturas, como compósitos reforçados com malhas, por exemplo.

### 2.2.2 Malharia por trama

As malhas podem apresentar diferentes propriedades, características e geometrias de acordo com a direção em que os fios estão entrelaçados. Assim, é possível classificar as estruturas como malha por trama, onde as laçadas são formadas na direção da carreira (horizontal); e malha por urdume, onde a estrutura é formada na direção vertical, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura de (a) malha por trama e (b) malha por urdume



Fonte: Adaptado de (BUENO; CAMILLIERI, 2019)

Na malharia por trama, pode-se elencar elevada elasticidade e flexibilidade como principais características. Além disso, apresenta conforto ao usuário, assim, os artigos produzidos tendem a se moldar mais facilmente ao corpo. Outra característica específica é a recuperação elástica, na qual a malha retorna à sua forma original quando retirada a força ou compressão aplicada. Por fim, é importante destacar a elevada porosidade, que está associada ao conforto térmico oferecido pela malha (Hasani et al., 2017; Zhang et al., 2017).

A malha por urdume apresenta uma combinação da elasticidade da tecnologia de malharia por trama com a estabilidade do tecido plano. Esse tecido é utilizado desde artigos mais delicados, como rendas, e aplicações técnicas como redes geotécnicas. Na Tabela 1 são apresentadas as principais características da malha por trama e urdume.

Tabela 1 – Comparativo entre malha por trama e por urdume

<b>Características</b>	<b>TRAMA</b>	<b>URDUME</b>
Formação de laçadas	Largura do tecido	Comprimento do tecido
Encolhimento	Maior	Menor
Alimentação	Um fio para muitas agulhas	Um fio para cada agulha
Armazenamento de fios	Cones	Carretéis
Elasticidade	Elevada	Menor elasticidade e maior estabilidade

Fonte: Adaptado de (Hasani et al., 2017)

Com o avanço da tecnologia e o surgimento de novos materiais, as malhas têm sido alvo de pesquisa em diversos ramos. A tecnologia de malharia permite a obtenção de tecidos com estruturas simples e complexas, utilizados em várias aplicações. Dessa forma, com a necessidade de desenvolvimento de tecidos para utilização mais técnica, como na aeronáutica, automobilismo, construção civil, saúde, arquitetura e esportes, houve um crescimento nas pesquisas de têxteis com aplicação de malha. No estudo de Zhang e Ma (2018), são discutidas as propriedades associadas às estruturas de malhas para serem utilizadas na área da saúde. O autor descreve que, apesar de constituir um percentual menor de utilização na área médica, malhas podem ser aplicadas em vasos sanguíneos artificiais, *scaffolds*, bandagens, dentre outras aplicações.

Outro exemplo para utilização de malhas no segmento de têxteis técnicos foi apresentado na pesquisa de Zhang et al. (2017), em aquecedores vestíveis. Os autores desenvolveram um tecido com efeito de aquecedor a partir de malhas por trama de modal

eletricamente condutoras, apresentando aquecimento superior a 100 °C quando submetido a uma tensão menor que 3 V.

### 2.3 TÊXTEIS INTELIGENTES

Desde o seu surgimento, têxteis tem sido aplicados principalmente para oferecer proteção térmica, contra intempéries e demais condições que o ser humano possa ser submetido. Com o desenvolvimento da tecnologia e surgimento do *design*, os materiais têxteis vêm se modernizando e buscando oferecer, principalmente, outras funcionalidades, não somente ao vestuário, mas aos demais produtos nos quais os tecidos são aplicados. De acordo com Schwarz et al., (2010), é possível elencar três principais atividades na indústria têxtil: vestuário; têxteis para o lar e interiores; e têxteis técnicos.

Com o avanço da ciência surgiram outras categorias de produtos dentro do segmento dos têxteis técnicos: os têxteis inteligentes. Cherenack e Van Pieterse (2012) descreveram que as primeiras investigações acerca dos têxteis inteligentes surgiram em meados de 1955, a partir de estudos desenvolvidos pelos matemáticos Edward Thorp e Claude Shannon, sobre um computador portátil vestível. Em 1985, o engenheiro inglês Harry Wainwright desenvolveu peças de vestuário que se iluminavam a partir da utilização de fibra ótica, microprocessadores e led, podendo ser considerado um dos modelos percussores dos têxteis inteligentes (Syduzzaman et al., 2015). Posteriormente, em 1989 no Japão, foi concebido o conceito de materiais inteligentes a partir da criação de fios de seda com memória de forma, sendo reconhecido como o primeiro têxtil inteligente (Koncar, 2016). Ao final de 1990, surgiram as primeiras pesquisas sobre materiais inteligentes e estes começaram a serem introduzidos no setor têxtil a partir de fibras e fios. No início dos anos 2000 surgiu a primeira geração de semicondutores têxteis trazendo propriedades eletrônicas aos tecidos, dando origem aos *e-textiles*, ou e-têxtil, em português, ou seja, a junção entre eletrônicos e materiais têxteis (Koncar, 2016; Syduzzaman et al., 2015).

O desenvolvimento dos dispositivos inteligentes é multidisciplinar e envolve diversas áreas como ciência dos materiais, engenharia têxtil, química, elétrica e eletrônica. Schwarz et al. (2010) citam que a área dos têxteis inteligentes tem potencial de combinar diversas tecnologias incorporando ciência, tecnologia e *design*. Syduzzaman et al. (2015) afirmam que a construção de tecidos inteligentes se dá a partir da combinação dos têxteis tradicionais e áreas da ciência (materiais, mecânica, estrutural, sensores, processamento e inteligência artificial). O

conceito de têxteis inteligentes é muito abrangente e seu entendimento depende da matéria-prima utilizada, da estrutura do dispositivo desenvolvido e principalmente da sua aplicação.

Na literatura, os têxteis inteligentes são conceituados como estruturas que a partir de um estímulo apresentam algum tipo de resposta. Nos estudos de Yilmaz (2018), Schwarz et al. (2010) e Koncar (2016), foi descrito que o termo 'inteligência' é definido por sentir e reagir a estímulos externos (sejam eles mecânicos, elétricos, químicos, térmicos, magnéticos, entre outros, de maneira previsível e útil. Stoppa e Chiolerio (2014) ainda definiram os têxteis inteligentes como fibras, filamentos e fios, a partir de uma estrutura de tecido plano, malha ou não tecido que apresentam interação com o ambiente a partir de um estímulo.

O uso das estruturas têxteis é interessante devido à sua capacidade de se conformar em estados estáticos ou dinâmicos, proporcionar conforto ao usuário quando em contato com a pele e se adaptar perfeitamente como substrato têxtil. (Yilmaz, 2018). Assim, as estruturas têxteis podem apresentar funções específicas que juntas formam um sistema têxtil inteligente. De acordo com Schwarz et al. (2010), os têxteis inteligentes também possuem uma função atuante, que recebe estímulos de agentes externos e responde ao ambiente, e uma função adaptativa, que não apenas fornece uma resposta imediata aos estímulos, mas também adapta seu comportamento às circunstâncias em que estão inseridos.

Os têxteis inteligentes reagem e respondem de acordo com o estímulo imposto a ele, dessa maneira, tornam-se materiais interessantes para diferentes aplicações. Maestri et al. (2023) citam que os têxteis inteligentes podem ser obtidos a partir de duas possíveis rotas, a partir da modificação da superfície do substrato ou desenvolvido a partir de materiais que já apresentam propriedades intrinsecamente especiais. Além disso, esses materiais desempenham três funções que constituem o sistema têxtil inteligente: função de detecção para os têxteis inteligentes passivos; função atuante, no qual estímulo é sentido e há uma atuação sobre ele; e função adaptativa, que adapta seu comportamento às circunstâncias (Schwarz et al., 2010).

Os e-têxteis são estruturas eletrônicas inteligentes que reúnem características que o tecido (plano ou malha) pode oferecer, com a geração e condução de campo elétrico, a partir da inclusão de materiais eletronicamente funcionais. Esses materiais são constituídos por três partes principais: os sensores, que são caracterizados como o sistema nervoso que detecta os sinais externos; os atuadores, que atuam sobre os estímulos detectados; e a unidade de controle, que gerencia e coordena as funções e componentes do sistema. Os têxteis eletrônicos podem ser classificados como ativos ou passivos dependendo da sensibilidade e nível de inteligência inerente para reação aos estímulos (Singha; Kumar; Pandit, 2019).

Para a construção dos e-têxteis pode-se utilizar têxteis produzidos a partir de tecnologias convencionais que apresentam boa capacidade de deformação, resistência mecânica, principalmente à tração, baixa massa, baixo custo e flexibilidade. Wu, Michael e Carmichael (2021) citam que o conforto e usabilidade dos e-têxteis são provenientes das estruturas que os constituem, pois são constituídos de fios entrelaçados, proporcionando maior deformação e tensão a partir de movimentos gerados durante o uso. Essas características tornam o material interessante para serem aplicadas no campo eletrônico, pois facilita a integração com as plataformas computacionais ou dispositivos implantados nos substratos têxteis (Chen et al., 2020). Além disso, pode-se incorporar diversos materiais, como polímeros condutores, materiais com mudança de forma, sensores. De acordo com Syduzzaman et al. (2015), ao desenvolver um sistema inteligente, os materiais interagem de acordo com as características projetadas e com os estímulos em seu ambiente.

O desenvolvimento de estruturas para serem aplicadas como têxteis inteligentes é bem desafiador devido às especificidades que o material deve apresentar. Cherenack e Van Pieteron (2012) citam que as estruturas têxteis são interessantes para atuarem na integração com a eletrônica, afirmando que as fibras e fios que os compõem devem apresentar resistência mecânica adequada para suportar às constantes deformações, principalmente à tração e compressão, que o produto poderá ser submetido.

Os e-têxteis devem conter também a capacidade de lavabilidade, podendo ser aplicados em dispositivos eletrônicos à prova d'água para facilitar a limpeza do tecido sem danificar a funcionalidade presente. Cherenack e Van Pieteron (2012) citam também a necessidade de fornecer fontes de alimentação, baterias ou fontes recarregáveis. Esses requisitos têm gerado muitos estudos referentes a alternativas e miniaturização de dispositivos para geração e armazenamento de energia. Por fim, um dos desafios mais críticos é o desenvolvimento e comercialização dessas estruturas inteligentes devido à baixa escala de fabricação e o elevado valor agregado envolvido.

Atualmente, é viável estabelecer correlações entre estímulos e respostas ao conectar as propriedades primordiais dos materiais, sejam elas elétricas, magnéticas, ópticas, térmicas e mecânicas. Esse enfoque possibilita a concepção de uma ampla gama de materiais, adaptáveis a uma variedade de aplicações distintas. Na Tabela 2 é apresentada a relação entre estímulos e respostas nos têxteis inteligentes descritos nos trabalhos de Chen et al. (2020), Ferreira, Ferreira e Oliveira (2014) e Gauche et al. (2022).

Tabela 2 – Relação estímulo versus resposta dos têxteis inteligentes

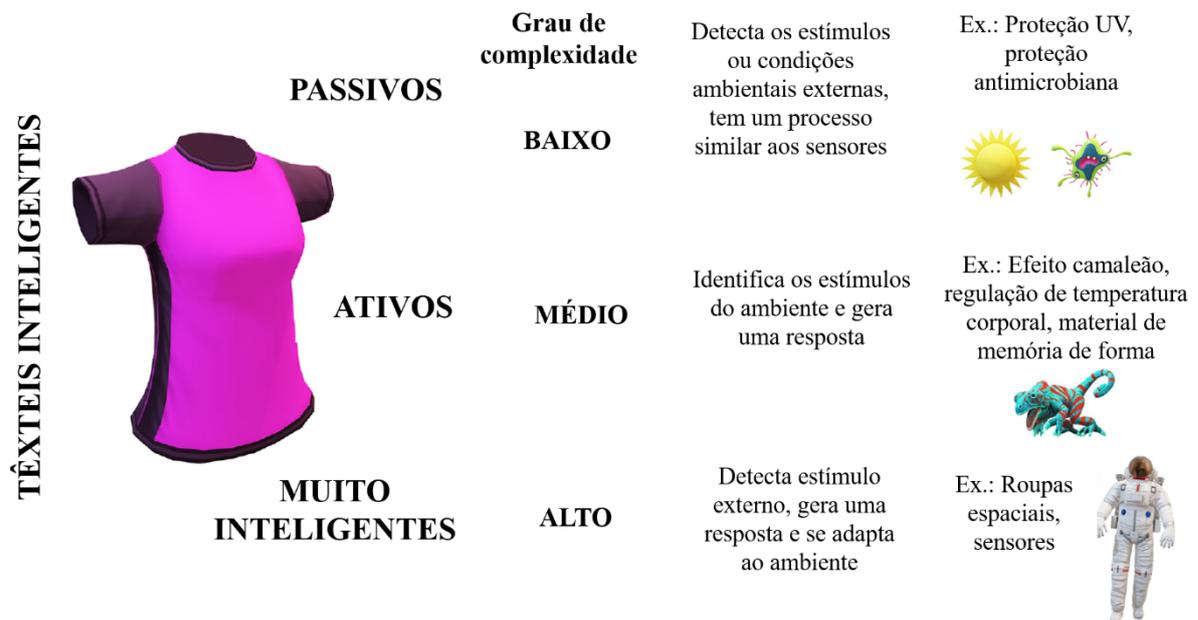
<b>Estímulo</b>	<b>Resposta</b>	<b>Definição</b>
Elétrico	Ótico	Eletrocromico/eletroluminescente
		Eletro-ótico
	Térmico	Termoelétrico
	Mecânico	Piezoelétrico
		Fluido dielétrico
		Eletro reológico
Magnético	Ótica	Magneto-ótico
	Mecânico	Fluido magneto reológico
		Megnetoresistivo
Ótico	Elétrico	Fotocondutor
	Ótica	Fotocromico
Térmico	Ótica	Termocromico
		Termoluminescente
	Térmico	Materiais com mudança de fase
	Mecânica	Memória de forma
Mecânico	Elétrico	Piezoelétrico / eletro-resistivo
	Magnético	Magnetoresistivo
	Ótica	Mecânico-cromico
	Mecânico	Auxéticos

Fonte: Próprio autor

Diante dos diversos estímulos e respostas emitidos pelos têxteis inteligentes, é possível construir sistemas inteligentes para serem aplicados em diversas áreas, como saúde, esporte, engenharia, construção civil, dentre outras. Para avaliar qual é o melhor sistema a ser aplicado, é essencial compreender as necessidades do dispositivo desenvolvido, que inclui classificá-lo de acordo com o tipo de estímulo, o grau de sensibilidade do material e a resposta esperada (Ferreira; Ferreira; Oliveira, 2014b; Grancarić et al., 2018; Shi et al., 2019).

A classificação dos têxteis inteligentes se baseia no grau de sensibilidade e reação aos impulsos que são sentidos no ambiente e à adaptação ao meio. Podem ser classificados de acordo com a geração (primeira, segunda ou terceira geração) ou como passivos, ativos e muito inteligentes, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Classificação dos têxteis inteligentes



Fonte: Maestri et al., 2023

Os dispositivos inteligentes possuem complexidade que vai desde uma escala de baixa a muito elevada e para desenvolvê-los são necessários materiais específicos de elevado desempenho, que cumpram a função a que foram designados. Em pesquisas como em Zhang et al. (2022), foi desenvolvido um têxtil inteligente multimodal que tem a capacidade de medir simultaneamente o pulso e a temperatura, sem interferências externas. Segundo os autores, o maior desafio desse desenvolvimento está na diferenciação de múltiplos estímulos e respostas que o dispositivo é capaz de gerar. Para o desenvolvimento do têxtil inteligente neste estudo, baseia-se no crescimento do molibdato de ferro ( $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ ) em nano/microfibras porosas de grafeno e poliuretano termoplástico (grafeno/ $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ /TPU) com núcleo elástico revestido por filamentos de poliamida, obtendo-se ao final um material de elevada estabilidade térmica e tempo de resposta rápida. Esse dispositivo se tornou promissor para ser utilizado como sensores vestíveis para monitoramento de saúde.

Outra pesquisa recente acerca de têxteis inteligentes é apresentada no trabalho de Chen et al. (2023). Neste estudo, os autores desenvolveram fibras inteligentes com múltiplas respostas para estímulos térmicos, elétricos, mecânicos e de umidade a partir de holocelulose e nanotubos de carbono produzidas por fiação úmida. O material desenvolvido apresentou propriedades interessantes como autolimpeza, isolamento e gerenciamento térmico, capacidade multifuncional de detecção de movimento humano e proteção. A maior limitação para esse estudo consistiu na dificuldade de projetar fibras inteligentes que sejam flexíveis e que

apresentem elevada resistência mecânica aliados com funções inteligentes, integrativas e responsivas a estímulos externos.

Os têxteis hidrocrômicos também são um exemplo de têxteis inteligentes. Esses materiais possuem a especificidade de alterar suas propriedades visuais, ou seja, alterar sua cor quando em contato com o estímulo, nesse caso a água. Em Gauche et al. (2022), foi funcionalizado um tecido de malha a partir do método de serigrafia com agente hidrocrômico. Foram estudadas as propriedades de reversibilidade à diferentes agentes e solidez da estampa após ciclos de lavagens e ensaios de fricção, indicando bons resultados no que se refere ao retorno da cor original e solidez.

Na área de eletrônicos vestíveis são encontradas diversas tecnologias associadas à materiais diferenciados como nos estudos de Ovhal et al. (2023), no qual foi desenvolvido, a partir de tecnologias optoeletrônicas, fibras que ofereçam maior flexibilidade a um menor custo. Essas fibras foram produzidas a partir de um eletrônico condutor transparente de poli(3,4-etilenodioxitiofeno) poliestireno sulfonato (PEDOT:PSS), com fibras de prata depositadas e incorporadas a um substrato têxtil de poliimida. Esse têxtil inteligente apresentou excelente condutividade elétrica, maior flexibilidade e de acordo com os autores, esse dispositivo foi testado e capaz de acender um diodo emissor de luz comercial tornando-se uma alternativa para utilização em eletrônicos vestíveis.

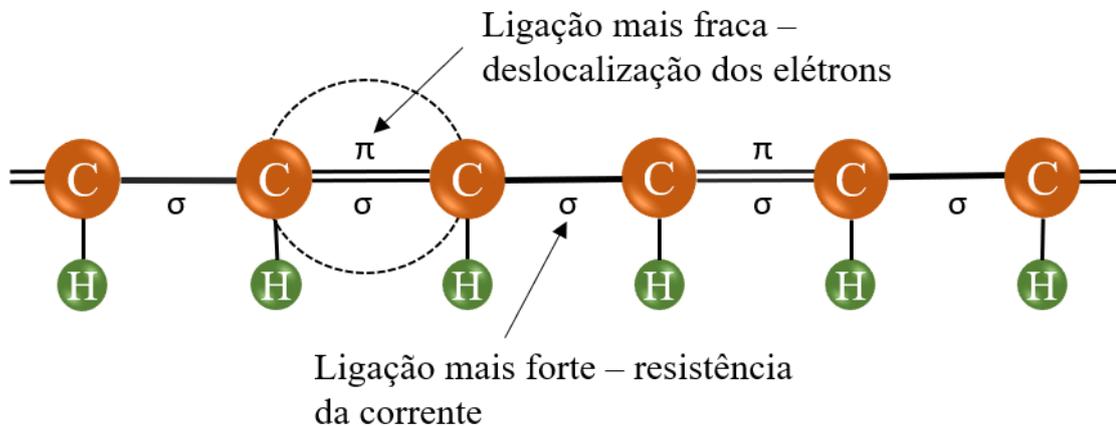
Diante do exposto, verifica-se que a área dos têxteis inteligentes é muito promissora para o desenvolvimento de novas tecnologias para serem utilizadas em dispositivos e aplicadas nas áreas de eletrônicos e monitoramento de diversas naturezas. Além disso, a utilização de matérias-primas com propriedades diferenciadas como polímeros piezoelétricos e polímeros condutores, por exemplo, para a construção desses têxteis especiais, contribuem no surgimento de novos materiais com características especiais e propriedades mais avançadas.

## 2.4 POLÍMEROS INTRINSICAMENTE CONDUTORES

Os polímeros intrinsecamente condutores (PICs) podem atuar na área dos têxteis inteligentes como eletrodos ou interligação entre diversos componentes. Segundo Syduzzaman et al. (2015), os PICs possuem propriedades de detecção e atuação, que ao se unir a um têxtil, podem ser classificados como têxtil inteligente ativo. São materiais orgânicos que possuem cadeias com ligações simples (ligação  $\sigma$ ) e duplas (ligação  $\pi$ ) insaturadas conjugadas, conforme apresentado pela Figura 8, que permitem o fluxo livre de elétrons. A ligação  $\sigma$  é mais forte e possui elevada densidade de elétrons localizados, enquanto a ligação  $\pi$  é mais fraca e fornece

maior mobilidade, formando orbitais estendidos na estrutura. O fluxo se dá a partir do movimento dos elétrons nos orbitais e pelas vacâncias (espaços vazios) localizadas nas estruturas desses polímeros. Segundo Medeiros et al. (2012), a condução em uma cadeia polimérica ocorre a partir da adição ou retirada dos elétrons formando vazios. Essas vacâncias levam à formação de um estado eletrônico denominado polaron, um cátion radical que se associa a uma distorção da cadeia localização das cargas nas cadeias são favorecidas a partir da oxidação por distorção dessas cadeias poliméricas.

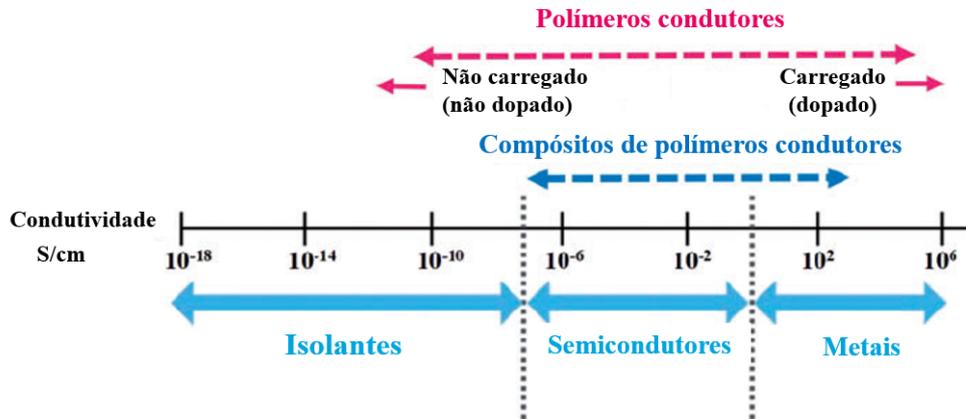
Figura 8 – Estrutura de um PICs com ligações conjugadas



Fonte: Próprio autor

Até as primeiras descobertas das propriedades condutoras dos polímeros, esses materiais eram utilizados como isolantes elétricos. Para configurar um material como isolante, ele deve apresentar condutividade na faixa entre  $10^{-10}$  e  $10^{-18}$  S/cm (Siemens/centímetro) conforme apresentado na Figura 9 (Grancarić et al., 2018). No estado neutro, os polímeros condutores também apresentam comportamento isolante e para a mudança de estado, são necessárias reações de oxidação, redução ou processo de dopagem da cadeia polimérica.

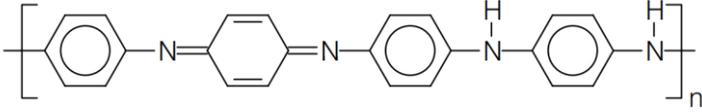
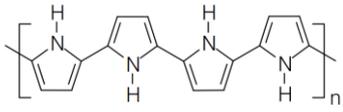
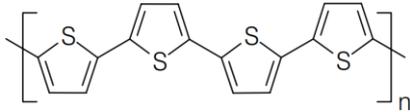
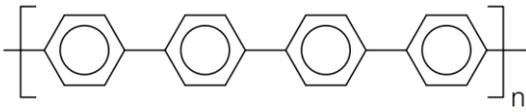
Figura 9 – Comparativo entre condutividade elétrica dos polímeros e outros materiais



Fonte: Adaptado de (Grancarić et al., 2018)

Na Tabela 3 são apresentadas as estruturas dos principais polímeros intrinsecamente condutores e suas respectivas condutividades. As estruturas desses polímeros são lineares, o que possibilita o fluxo dos elétrons. Polímeros como polianilina (PANI), polipirrol (PPy), politiofeno (PTh) e poli(3,4-etilenodioxitiofeno) (PEDOT), representados na Tabela 3 necessitam de reações de redução ou oxidação para apresentar seu estado condutor. Esses materiais possuem efeito dopagem-desdopagem que pode ser aplicado em vários dispositivos (Grancarić et al., 2018a). De acordo com Han e Dai (2019), a condutividade de polímeros condutores pode ser aumentada em diversas ordens de magnitude quando muda-se a estrutura das ligações a partir da dopagem. Grancarić et al. (2018) afirma que para tornar-se um PIC em condutor é necessário primeiramente observar na estrutura do polímero, a densidade de ligações simples e duplas alternadas e perturbar essa estrutura removendo ou inserindo elétrons.

Tabela 3 – Estruturas dos principais polímeros intrinsecamente condutores

Polímero	Condutividade (S/cm)
 <p>Poliacetileno</p>	$10^3$ a $10^6$
 <p>Polianilina</p>	$10$ a $10^3$
 <p>Polipirrol</p>	600
 <p>Politiofeno</p>	200
 <p>Poli(<i>p</i>-fenileno)</p>	500
 <p>Poli(<i>p</i>-fenileno vinileno)</p>	1

Fonte: Adaptado de (Faez et al., 2003)

O processo de dopagem se dá pela modificação química a partir de reações de oxidação ou redução em polímeros e é muito semelhante ao que ocorre nos materiais semicondutores. Durante a dopagem, os contra-íons dopantes são inseridos na cadeia e permanecem adicionando ou removendo elétrons que mantem ligados à estrutura durante o estado condutor do material. Medeiros et al. (2012) descrevem que em polímeros como poliacetileno e polipirrol, os elétrons são retirados no pico da banda de valência, formando espaços vazios que facilitam o

deslocamento dos elétrons ao longo da cadeia. Quando os elétrons são retirados localmente, são formados polarons de baixa mobilidade em relação aos contra-íons adicionados à cadeia durante a dopagem. Assim, para tornar o polímero no estado isolante em material condutor, é necessária uma maior concentração de agente redutor/oxidante durante a dopagem.

Os polímeros condutores podem ser aplicados em diversas áreas, inclusive nos têxteis inteligentes. Os materiais condutores podem atuar no armazenamento de energia a partir do acúmulo/liberação de contra-íons sob o campo elétrico proveniente das reações oxirredução que ocorre durante o processo de dopagem (Firoz Babu et al. 2013). Em e Selvam e Yim (2023), por exemplo, foi estudado o desenvolvimento de dispositivos de armazenamento de energia a partir de eletrólitos de suor com a utilização de tecido algodão para obter aumento de autocarga e supercapacitores têxteis flexíveis. Para isso, foi utilizado o polímero condutor de compósito de poliofeno com trisaminoetilamina (PEDOT:TREN:MnO) para funcionalização do substrato têxtil. O dispositivo têxtil obtido apresentou 92% de desempenho após 50000 séries de descarga de carga e capacitância específica. Além disso, apresentou biocompatibilidade quando em contato com o corpo humano. Esse têxtil condutor inteligente torna-se promissor para utilização em sistema de armazenamento de energia incorporado em têxteis vestíveis.

Outra aplicação para polímeros condutores pode ser observada na pesquisa de Jia et al. (2022), na qual foi desenvolvido um condutor inteligente que possui memória de forma para atuar como alarme de incêndio a partir do polímero poli(caprolactona) (PCL). Nesse dispositivo, buscou-se explorar as propriedades do PCL aliando a capacidade de memória de forma com a condutividade intrínseca de um homopolímero trifuncional de diisocianato de hexametileno (THDI). Foi formada uma rede reticulada com esses polímeros explorando a capacidade de alternar o estado não condutivo e condutivo a baixas e elevadas temperaturas, respectivamente, formando o sistema '*OFF-to-ON*'. Esse substrato foi testado em experimentos ao ar livre podendo apresentar respostas a incêndio atuando efetivamente como alarme.

Em Lund et al. (2020) também é apresentado os polímeros condutores como uma nova oportunidade de desenvolver geradores têxteis termoelétricos flexíveis, leves e de fácil adaptação. Neste estudo, o principal objetivo foi desenvolver uma linha de costura eletricamente condutora a partir dos polímeros condutores PEDOT:PSS. Os autores avaliaram a influência do *design* do dispositivo e o desempenho do sistema eletrônico vestível. Como resultado foram obtidas potência de 1,2  $\mu\text{W}$  a uma temperatura de 65 K e 0,2  $\mu\text{W}$  a 30 K. Conclui-se que o substrato obtido a partir do fio condutor é muito promissor na sua utilização em têxteis eletrônicos.

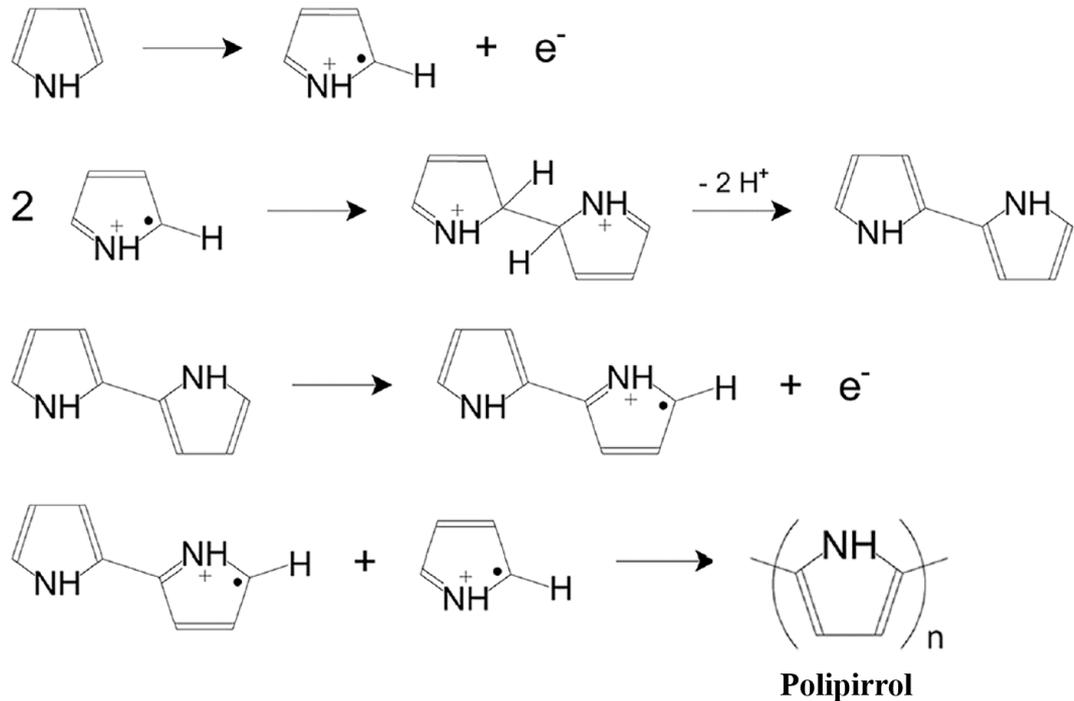
### 2.4.1 Polipirrol

Dentre os polímeros condutores, destaca-se o polipirrol (PPy), que é um polímero muito estudado devido às suas aplicações promissoras no campo de desenvolvimento de sensores. O PPy possui cadeias aromáticas de cinco membros ligados ao grupo amino ( $\text{NH}_2$ ). É um polímero que possui baixa resistividade elétrica ( $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ), processo e síntese simplificados, não toxicidade, boa aderência aos substratos e elevada estabilidade química (Gunasekara et al., 2022).

O polipirrol pode ser sintetizado a partir da polimerização química ou eletroquímica que se dá pela remoção de elétrons e cargas positivas da estrutura a partir da utilização de um agente oxidante. O pirrol, inicialmente, apresenta seu estado neutro a partir da formação do benzeóide. O estado neutro possui um elevado *gap* de energia, impedindo a transferência de elétrons entre bandas assumindo características de material isolante (Merlini, 2014). Durante a polimerização, são inseridos elétrons na cadeia do monômero de pirrol a partir de um agente oxidante, como o Cloreto de ferro (III) hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), por exemplo. Os íons inseridos causam perturbação na estrutura ocasionando quebra das ligações mais fracas (ligações  $\pi$ ), assim são formadas estruturas mais estáveis e positivas.

Na literatura, a polimerização oxidativa é muito descrita, principalmente com o agente oxidante Cloreto de ferro (III) ( $\text{FeCl}_3$ ), devido ao seu processo simples e à possibilidade de modificação das propriedades (Li et al., 2022; Merlini; Ramôa; Barra, 2013; Nie et al., 2023). Além disso, esse composto apresenta a função de oxidar o monômero de pirrol em meio aquoso obtendo radicais catiônicos quimicamente ativos. Na Figura 10 é apresentado o mecanismo de polimerização eletroquímica do pirrol, no qual elétrons são adicionados à sua estrutura durante o processo de polimerização, obtendo como produto, o polipirrol.

Figura 10 – Mecanismo polimerização do Polipirrol



Fonte: Adaptado de (Li et al., 2022)

O PPy pode ser utilizado para funcionalizar superfícies de materiais e estruturas têxteis para torná-los extrinsecamente condutores. Em Firoz Babu et al. (2013) por exemplo, foi realizado o comparativo da funcionalização da superfície de várias estruturas têxteis utilizando o polipirrol. Para a obtenção desse polímero utilizou-se o processo de polimerização oxidativa *in situ* com o Cloreto de ferro (III) hexahidratado, como agente oxidante e, ao final, a estrutura têxtil é revestida por uma fina camada polimérica fisicamente adsorvida promovendo uma adesão forte polímero/substrato.

Nesta pesquisa o principal objetivo foi encontrar um método bem-sucedido, simples e reproduzível para a fabricação de supercapacitores baseados em têxteis e a química da interação superficial da molécula de PPy com tecidos naturais e sintéticos. Ao final da pesquisa, os eletrodos desenvolvidos de PPy-têxtil são comparativamente mais leves que os substratos usuais e são materiais promissores para a fabricação de supercapacitores e sensores flexíveis. Bober et al. (2015) indicam que a polimerização e deposição *in situ* é um dos processos mais promissores para área de materiais condutores possibilitando o desenvolvimento de novos dispositivos com propriedades elétricas diferenciadas como condutividade aprimorada, alta estabilidade elétrica, em casos de e-têxteis, dispositivos eletrônicos flexíveis, dentre outros.

## 2.5 PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO

Diante da necessidade de miniaturização dos dispositivos e do desenvolvimento dos eletrônicos vestíveis, a utilização de têxteis inteligentes, principalmente os que possuem propriedades eletro/eletrônicas, vem ganhando atenção nos últimos anos. Kalimuldina et al. (2020) citam em sua pesquisa, que o interesse por microdispositivos de coleta de energia contribui para o aumento de vida útil de dispositivos portáteis e eletrônicos, pois funcionam utilizando fontes alternativas de energia como vibrações mecânicas oriundas de um movimento humano, por exemplo.

Os substratos têxteis são tratados desde os primórdios para o desenvolvimento do vestuário. Fibras de algodão e viscose são conhecidas e estudadas, não somente para serem utilizadas em peças de vestuário, como aplicadas em outras áreas, como no isolamento térmico e acústico na construção civil (Rahman; Siddiqua; Cherian, 2022; Srinivasan et al., 2023); na área da saúde (Wimmer; Zacharias, 2015; Zhang; Zeng; Tang, 2022); na área de compósitos atuando como agente de encapsulamento como descrito em (Salman et al., 2023; Weng; Zhang, 2023). Além da flexibilidade intrínseca aos materiais têxteis, a tecnologia de malharia se destaca na manufatura de produtos flexíveis, tornando-se uma alternativa interessante para o desenvolvimento de têxteis inteligentes vestíveis e que sejam sobretudo confortáveis.

Os polímeros condutores podem ser utilizados na condução de cargas geradas a partir de estímulos externos. Com isso o intuito deste trabalho é trazer uma alternativa para a construção de um dispositivo têxtil utilizando malhas comerciais (algodão e viscose) funcionalizada com polímero condutor (polipirrol) para o desenvolvimento de eletrônicos vestíveis. O maior desafio está na obtenção da camada condutora e na definição da condição ótima de funcionalização, visto que estudos que utilizem malhas como substrato são pouco vistos na literatura. Além disso, há desafios na montagem e utilização de estímulos para a criação do campo elétrico para atuar como eletrônicos vestíveis, bem como na investigação do comportamento dessa camada condutora após repetidos ciclos de lavagem simulando o uso.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Para a construção da malha condutora foram definidas as fibras e as estruturas a serem analisadas. Malhas a partir de algodão e viscose são de fácil obtenção e muito utilizadas no vestuário e diversos outros produtos. As estruturas escolhidas foram a meia-malha (jersey) e o rib, que foram gentilmente doadas pelas empresas Benutex Malhas e RVB Malhas, respectivamente.

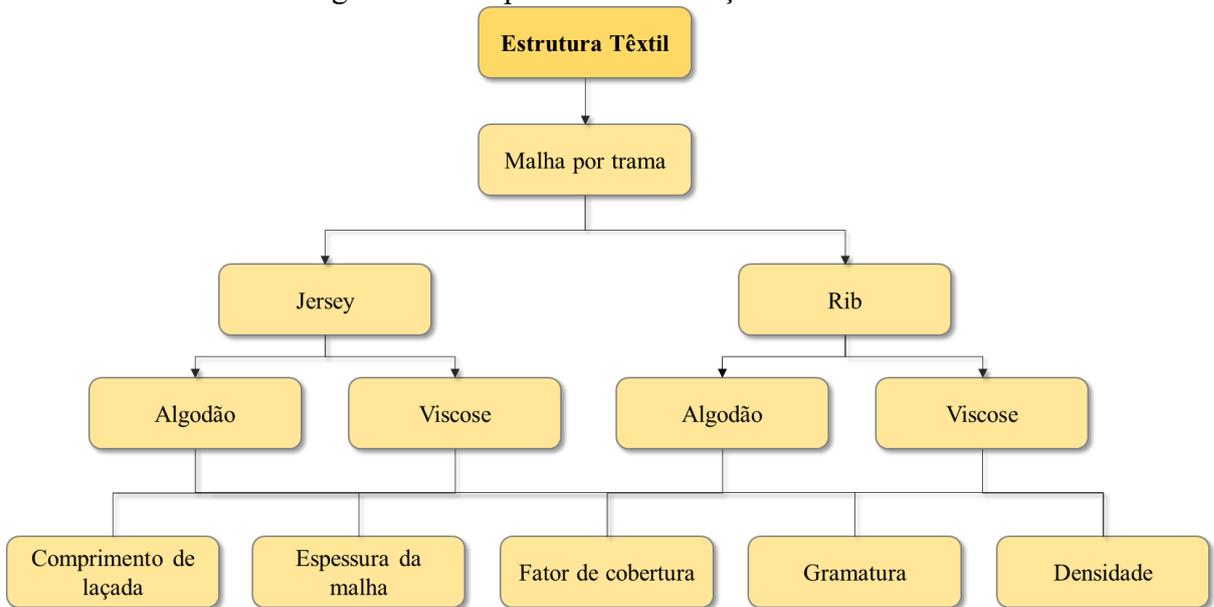
Para a funcionalização das malhas com polímero condutor foi utilizado o monômero de pirrol líquido da marca Sigma Aldrich, com massa molar  $67 \text{ g.mol}^{-1}$ . Como agente oxidante utilizou-se o Cloreto Férrico Hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) da marca Dinâmica com  $270,3 \text{ g.mol}^{-1}$  de massa molar.

#### 3.2 METODOLOGIA

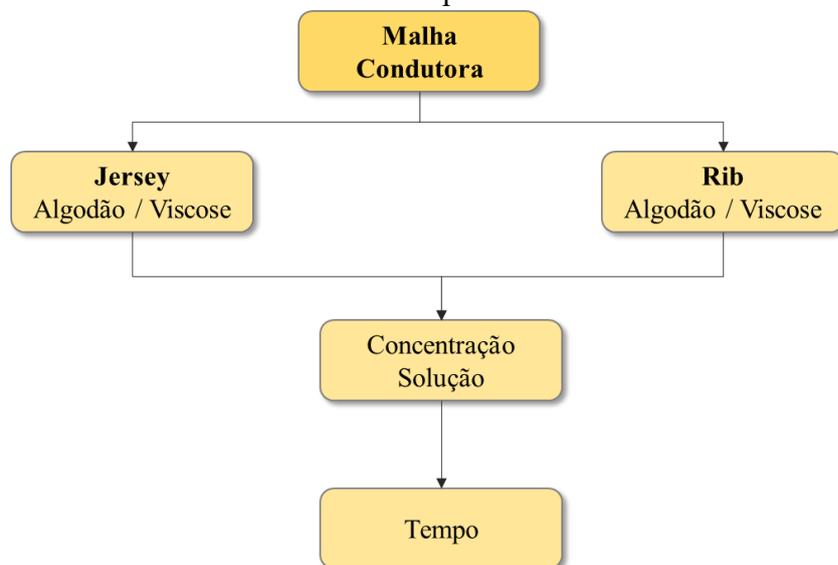
A parte experimental dessa pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios de Tecidos e Malhas (LABTEC), Laboratório de Transformações e Materiais Avançados (LTMA), Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE), Laboratório de Polímeros e Compósitos (POLICOM) e no Laboratório de Desenvolvimento de Produtos Têxteis (LDPT), Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), todos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A metodologia desse trabalho foi desenvolvida em 4 etapas principais: i) caracterização das malhas (Figura 11); ii) revestimento das malhas com polipirrol para obtenção de um material condutor (Figura 12); iii) caracterização das malhas condutoras (Figura 13); iv) verificação da condutividade após a lavagem das malhas condutoras (Figura 14). Para a análise dos resultados as amostras foram chamadas como CO para algodão e CV para viscose.

Figura 11 – Etapa 1: Caracterização das malhas



Fonte: Próprio autor

Figura 12 – Etapa 2: Obtenção das malhas condutoras através da polimerização oxidativa *in situ* do pirrol

Fonte: Próprio autor

Figura 13 – Etapa 3: Caracterização das malhas condutoras

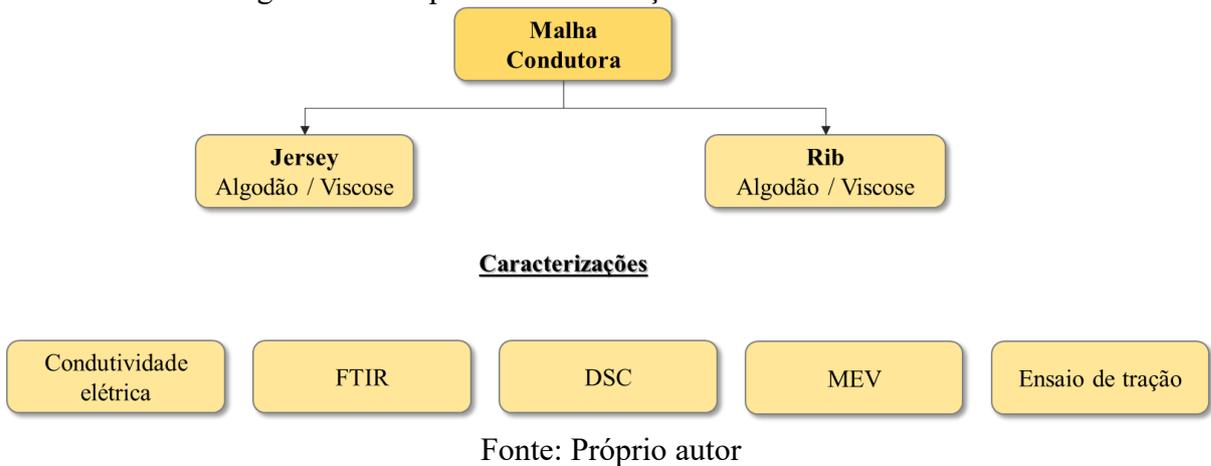
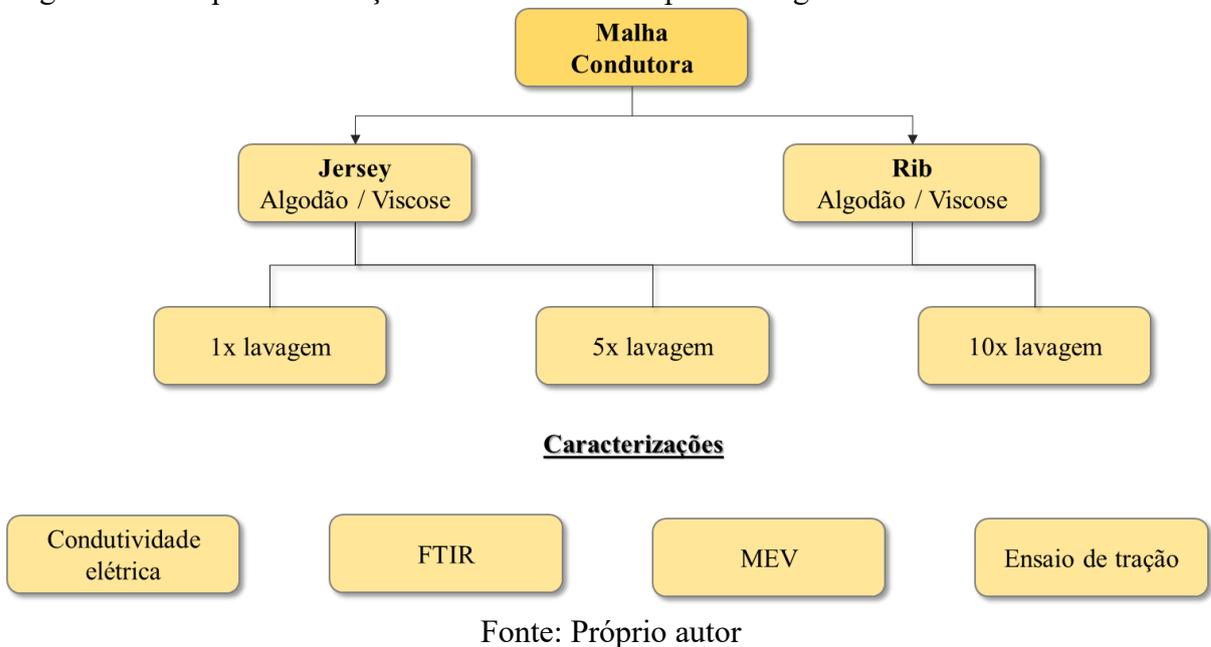


Figura 14 – Etapa 4: Avaliação da condutividade após a lavagem das malhas funcionalizadas



### 3.2.1 Etapa 1 – Caracterização das malhas

As malhas foram caracterizadas a partir das seguintes análises: comprimento de laçada, espessura, fator de cobertura, gramatura e densidade, conforme metodologia descrita a seguir.

#### 3.2.1.1 Comprimento de laçada

O comprimento de laçada foi obtido a partir do método padrão onde foram contadas 50 colunas, cujas e as dimensões foram avaliadas utilizando-se o equipamento *Maillimeter*, que se encontra LABTEC-UFSC. O procedimento foi repetido em 10 amostras e o resultado de comprimento de laçada foi dado pela média, em centímetros, seguindo a Equação 1.

$$CL = \frac{\bar{l}}{50} \quad [1]$$

Onde:

$CL$  = Comprimento de laçada em cm;

$\bar{l}$  = Média aritmética do comprimento das 50 colunas.

### 3.2.1.2 Espessura da malha

Para o cálculo da espessura da malha ( $EM$ ) em milímetros o tecido foi dobrado em 6 camadas e a espessura medida utilizando-se um paquímetro, obtendo-se a espessura da malha total. A seguir foi calculada a razão entre a espessura total e a quantidade de camadas (Equação 2).

$$EM = \frac{\text{Espessura medida}}{\text{Quantidade Camadas}} \quad [2]$$

### 3.2.1.3 Título do fio

O cálculo do título do fio das malhas foi realizado de acordo com a norma NBR 13214 – Determinação do Título do Fio, utilizando-se o sistema de cálculo direto, conforme a Equação 3. Para isso, foi necessário utilizar uma balança para obter a massa (gramas) de um fio com 0,1 m de comprimento. O cálculo foi feito a partir da razão entre a massa do fio pelo comprimento. As medidas do comprimento e massa do fio foram realizadas em triplicata.

$$\text{Título do fio [tex]} = \frac{\text{Massa do fio [g]}}{\text{Comprimento do fio [m]}} \quad [3]$$

### 3.2.1.4 Fator de cobertura

Para o cálculo de fator de cobertura da malha foi utilizada a Equação 4.

$$FC = \frac{\sqrt{\text{tex}}}{l} \quad [4]$$

Onde:

tex = Título do fio em tex;

$l$  = comprimento da laçada [cm]

### 3.2.1.5 Gramatura da malha

A gramatura da malha foi calculada a partir da massa da amostra de uma área conhecida. Para a análise da gramatura utilizou-se a balança de precisão que se encontra no laboratório LTMA. Esse ensaio foi realizado em triplicata no qual foram utilizadas três amostras de 10 x 10 cm e a gramatura se deu a partir da Equação 5.

$$G = \frac{m}{A} \quad [5]$$

Onde:

G = Gramatura [g/m<sup>2</sup>];

m = Massa em gramas;

A = Área em m<sup>2</sup>.

### 3.2.1.6 Densidade da malha

A análise da densidade das malhas foi realizada conforme a norma técnica ABNT NBR 12060:1991 – Materiais Têxteis – Determinação do número de carreiras/cursos em tecidos de malha – Método de Ensaio. Para essa análise foram utilizadas 3 amostras de cada estrutura de malha e posteriormente calculada a densidade média. Para o cálculo da densidade utilizou-se a Equação 6.

$$Densidade \left( \frac{\text{pontos}}{\text{cm}^2} \right) = \frac{n^{\circ} \text{ colunas}}{\text{cm}} \times \frac{n^{\circ} \text{ carreiras}}{\text{cm}} \quad [6]$$

### 3.2.1.7 Resistência à tração

Para avaliar a resistência à tração das malhas, foi utilizado o procedimento descrito pela norma ABNT NBR ISO 13934-1 – Têxteis – Propriedade de tração de tecidos Parte 1: Determinação da força máxima e alongamento à força máxima utilizando o método de tira. Foi realizada uma adaptação no comprimento do corpo de prova devido à limitação de produção das malhas condutoras, onde a dimensão foi de 40 x 40 ± 5 mm. As amostras foram tracionadas no equipamento de ensaio universal a uma taxa de velocidade constante de 20 mm/min até o seu rompimento. Por ser um tecido de características elastoméricas, foi utilizada uma pré-tensão de 0,5 N conforme descrito na norma. Após a funcionalização da superfície das malhas com o polímero condutor PPy e após os três ciclos de lavagem, foi avaliado novamente a resistência a tração dos materiais, a tensão e deformação de ruptura e o módulo de elasticidade. O ensaio de resistência à tração foi realizado em triplicata para garantir a precisão e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

### 3.2.2 Etapa 2 – Obtenção da malha condutora

#### 3.2.2.1 Polimerização oxidativa *in situ* do pirrol

Para o revestimento das malhas com polímero condutor foi necessário definir os parâmetros para a polimerização oxidativa *in situ* do pirrol (Py) na presença das malhas. Inicialmente, foram utilizadas as condições descritas no trabalho desenvolvido por Maestri (2022), nas quais foram aplicadas como condição padrão as molaridades de 0,2 mol de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  para 0,1 mol de Py, resultando em uma razão molar de 2:1 [ $\text{FeCl}_3$ :Py] conforme mencionado, também, no trabalho de Merlini et al. (2014). As demais concentrações da solução de  $\text{FeCl}_3$  e Py testadas, foram calculadas a partir da condição inicial reduzindo-se pela metade:  $\text{PPy}_{[0,08]}$  (0,083 mol) e  $\text{PPy}_{[0,04]}$  (0,042 mol) da molaridade. A condição inicial não foi incluída nas análises devido ao excesso de PPy depositado na superfície, o que resultou em partículas soltas durante o manuseio da amostra, podendo interferir no processo de caracterização. O tempo de polimerização foi um parâmetro analisado também, definindo-se 30 e 60 minutos. As condições analisadas estão descritas na Tabela 4

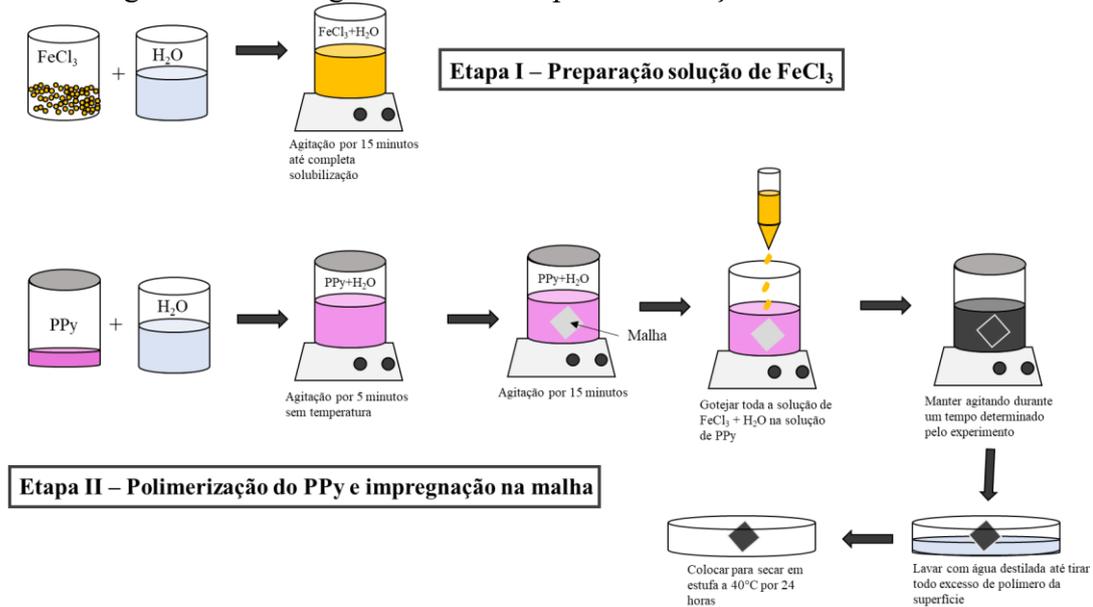
Tabela 4 – Condições utilizadas para polimerização da malha condutora com PPy

Fibras	Estrutura	Condição	$\text{FeCl}_3$ [g]	Py [g]	Concentração solução [mol/L]	Tempo de polimerização
Algodão (CO)	Meia- malha	$\text{PPy}_{[0,3]}$	15,002	5,628	0,334	30 minutos 60 minutos
		$\text{PPy}_{[0,08]}$	3,751	1,407	0,083	
Viscose (CV)	Rib	$\text{PPy}_{[0,04]}$	1,875	0,704	0,042	

A polimerização oxidativa *in situ* foi conduzida utilizando-se as condições pré-determinadas, seguindo as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 15. Na etapa 1, foram utilizados 25 mL de água destilada e o  $\text{FeCl}_3$  foi pesado em gramas de acordo com a condição do experimento. A solução foi agitada por 15 minutos em um agitador magnético à temperatura ambiente. Em seguida, preparou-se a solução de pirrol (Py), utilizando 75 mL de água destilada e medindo-se a massa em gramas conforme a concentração do experimento. A solução de Py e água destilada foi agitada por 5 minutos antes de adicionar a malha para mais 15 minutos de agitação.

Na etapa 2, a solução de  $\text{FeCl}_3$  foi colocada em uma micropipeta e gotejada sobre a solução de PPy para a polimerização in situ. Após todo o gotejamento da solução, manteve-se a agitação pelo tempo definido no experimento (30 ou 60 minutos). A malha foi então retirada da solução de polipirrol (PPy) e lavada com água destilada até a remoção de todo o excesso de polímero na superfície.

Figura 15 – Fluxograma com as etapas de obtenção da malha condutora



Fonte: Próprio autor

Após o processo de polimerização, as amostras foram submetidas a uma lavagem com água destilada, seguida de secagem em estufa a  $40^\circ\text{C}$  por um período de 24 horas.

### 3.2.2.2 Análise visual

Um critério importante para determinar as condições ideais de polimerização da malha condutora é a avaliação visual e sensorial da amostra. As amostras secas foram analisadas qualitativamente quanto ao aspecto físico a partir do tato, com o objetivo de verificar se havia resíduo na sua superfície e se ocorria o desprendimento de partículas do polímero condutor da superfície da amostra ao manuseá-la. O critério de escolha para as análises de condutividade e demais ensaios químicos foi as condições das amostras que demonstrassem uma superfície mais uniforme e não apresentassem resíduos durante o manuseio.

### 3.2.3 Etapa 3 – Caracterização das malhas condutoras

#### 3.2.3.1 Espectroscopia infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Para a avaliação da efetividade da funcionalização a partir da polimerização do polímero condutor (PPy) na superfície das malhas, foi utilizada a técnica de FTIR no modo refletância total atenuada (ATR). As caracterizações foram realizadas em equipamento Espectrofotômetro Frontier FTIR – Perkin Elmer, presente no LTE. Foram analisados os espectros obtidos nos comprimentos de onda de 4000 a 600  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e 16 varreduras.

#### 3.2.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a verificação da morfologia das amostras das malhas antes e após a funcionalização com polipirrol, e depois os ciclos de lavagem, foi utilizada a avaliação de micrografias a partir do MEV. As análises foram realizadas em um microscópio da marca Jeol, modelo JSM-6390LV, no Laboratório Central de Microscopia (LCME). As amostras foram preparadas previamente com o revestimento em ouro sobre sua superfície para garantir a incidência do feixe de elétrons sobre a amostra durante a análise. As imagens foram obtidas utilizando-se uma tensão de 8kV.

#### 3.2.3.3 Condutividade elétrica

Para a análise de condutividade elétrica foi utilizado o método padrão de 4 pontas, onde foi incidida uma corrente elétrica a qual era forçada no sistema para mensurar a tensão resultante. Para a leitura de tensão foi utilizado o equipamento da marca Keithley, modelo 6220. A diferença de potencial foi medida entre os terminais internos, com auxílio do eletrômetro da marca Keithley, modelo 6517. Para essa análise foram realizadas 6 medições em locais distintos das amostras, nos dois lados. A condutividade da malha foi calculada a partir da Equação 7:

$$\sigma = \frac{I}{V} \times \frac{\ln 2}{\pi} \times \frac{1}{w} \quad [7]$$

Onde:

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

$w$  = Espessura da amostra [cm];

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

$I$  = Corrente elétrica [A];

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

### 3.2.3.4 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

Para a realização da análise de Calorimetria Diferencial de Varredura foi utilizado o equipamento da marca Marta TA instruments, modelo 2010. Foi utilizado, como condições experimentais, a taxa de aquecimento de 10 °C/min e faixa de temperatura entre 10 °C a 350 °C, em atmosfera de nitrogênio.

### 3.2.4 Etapa 4 – Processo de lavagem das malhas

Para a etapa quatro foi utilizada a norma ABNT 10320 – Materiais Têxteis – Determinação das alterações dimensionais de tecidos planos e malhas – Lavagem em máquina doméstica automática e ABNT NBR ISO105-C069 – Têxteis – Ensaio de solidez da cor – Parte C06: Solidez da cor à lavagem doméstica e comercial, adaptando-a de acordo com a realidade das amostras a serem analisadas. As malhas de algodão (CO) e viscose (CV), com a condição escolhida para análise, foram submetidas ao método de lavagem no agitador, com a velocidade de 250 rpm e temperatura de 40°C por 30 minutos. Para que não houvesse reações químicas durante a lavagem, foi utilizado sabão líquido comercial sem alvejante óptico na proporção de 4 mL para cada 1L de água. Após o período de agitação durante a lavagem, as amostras eram retiradas da solução, lavadas em água corrente e retornava ao processo de lavagem com uma nova mistura de água com sabão líquido. As amostras (com dimensões de 100 x 100 mm), funcionalizadas com polímero condutor, foram lavadas de acordo com os ciclos determinados no experimento e posteriormente, secas na estufa durante 24 horas, e posteriormente, avaliada a condutividade, FTIR, MEV e tração.

As malhas foram pesadas antes e após os ciclos de 1, 5 e 10 de lavagens. O processo de análise e os ciclos estão detalhados na Tabela 5.

Tabela 5 – Condições ensaio de lavagens das malhas condutoras

Fibras	Estrutura	Condição de polimerização	Tempo de polimerização	Lavagens
Algodão (CO)	Meia-malha	A definir melhor condição	A definir melhor tempo de polimerização	1x
	Rib			5x
Viscose (CV)	Meia-malha			10x
	Rib			

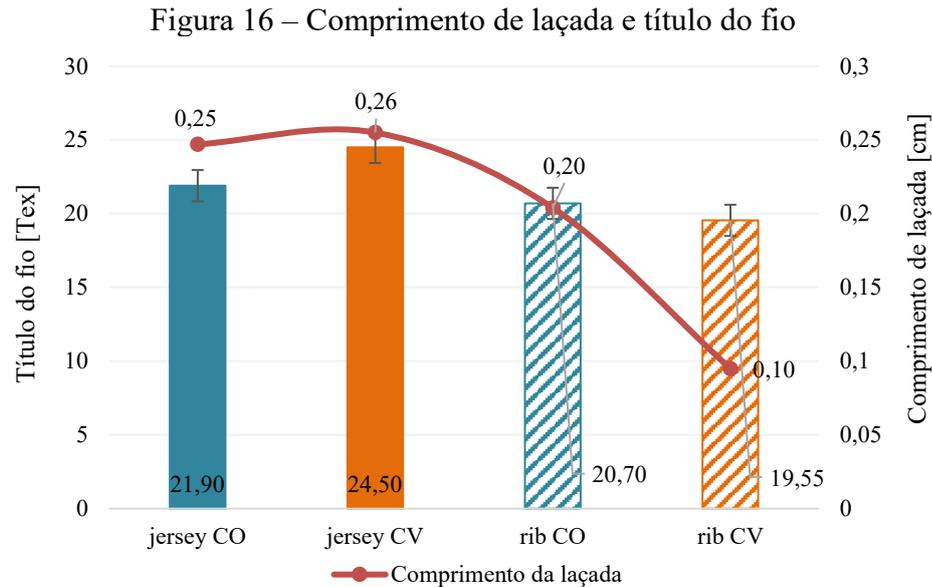
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as discussões dos ensaios realizados. Inicialmente, são discutidos os dados obtidos para a etapa de caracterização das malhas de algodão e viscose e posteriormente os resultados de análises químicas, térmicas e de condutividade elétrica.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MALHAS

As amostras de malha foram caracterizadas antes do processo de funcionalização superficial com PPy quanto aos seus parâmetros estruturais, relacionados ao comprimento de laçada, título do fio, espessura, fator de cobertura, gramatura e densidade das malhas. Essa caracterização estrutural é importante para compreender a influência do raporte, resistência mecânica e aspecto visual da malha antes e após a polimerização *in situ* do PPy. O comprimento da laçada afeta a flexibilidade do tecido; o título do fio influencia na resistência e na densidade da malha; a espessura do fio e o fator de cobertura influenciam na opacidade, durabilidade e até mesmo nas propriedades térmicas do tecido. Além disso, a gramatura e a densidade das malhas impactam na sua capacidade de retenção de umidade e aparência final.

Na Figura 16 são observados os resultados do comprimento da laçada das diferentes malhas. As malhas com estrutura jersey apresentaram as laçadas com comprimentos semelhantes, enquanto as laçadas das malhas de rib foram menores. A medida do título foi calculada em tex, no qual demonstra uma relação direta com o diâmetro do fio analisado. O jersey de CV apresentou o maior título direto se comparado às demais amostras, demonstrando que possui o maior diâmetro, enquanto as demais estruturas apresentaram um diâmetro de fio com valores de diâmetros bem próximos (Figura 16).



Fonte: Próprio autor

Na Tabela 6 são apresentados os resultados das análises de espessura das camadas e fator de cobertura das malhas. As malhas jersey e rib de CO apresentaram a espessura de cada camada de 0,36 mm e 1,04 mm e o fator de cobertura de 18,8 e 22,3, respectivamente. As malhas de jersey de CV e rib de CV apresentaram a espessura de cada camada de 0,44 mm e 0,92 mm e fator de cobertura de 17,9 e 46,7, respectivamente. A gramatura e a densidade das malhas também foram avaliadas, sendo que as malhas de estrutura jersey e rib de CO apresentaram gramatura média de 169,1 g/m<sup>2</sup> e 252,5 g/m<sup>2</sup> e densidade de 350,7 e 169,7, respectivamente. As malhas jersey e rib de CV apresentaram gramatura média de 180,6 g/m<sup>2</sup> e 446,4 g/m<sup>2</sup> e densidade de 423,0 e 367,6, respectivamente.

O comprimento de laçada e título do fio está relacionada ao fator de cobertura das malhas, que define o quão bem a superfície do tecido é coberta pelo fio. Quando uma malha apresenta elevado fator de cobertura terá menos espaços vazios para a entrada do polímero, porém possibilita o revestimento mais uniforme do polímero condutor na superfície do tecido. Além disso, influencia na adesão, pois malhas com elevado fator de cobertura possuem mais pontos de contato entre as fibras do tecido e o polímero condutor, garantindo a estabilidade durante o uso e lavagem. A gramatura e a densidade por sua vez, também afetam a propriedades dos tecidos como resistência mecânica e aparência. A gramatura está relacionada a uma massa por unidade de área e a densidade refere-se ao número de laçadas em uma determinada área do tecido. Portanto, um tecido com elevada densidade tende a ter uma gramatura mais alta.

Tabela 6 – Parâmetros estruturais das malhas

<b>Matéria prima</b>	<b>Espessura de camada [mm]</b>	<b>Fator de cobertura</b>	<b>Gramatura [g/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Densidade das malhas [pontos/ cm<sup>2</sup>]</b>
Jersey/CO	0,36	18,9	169,1 ± 10,2	350,7 ± 15,8
Jersey/CV	0,44	19,4	180,6 ± 16,5	423,0 ± 39,1
Rib/CO	1,04	22,3	252,5 ± 18,9	169,7 ± 7,9
Rib/CV	0,92	46,7	446,4 ± 18,5	367,6 ± 22,1

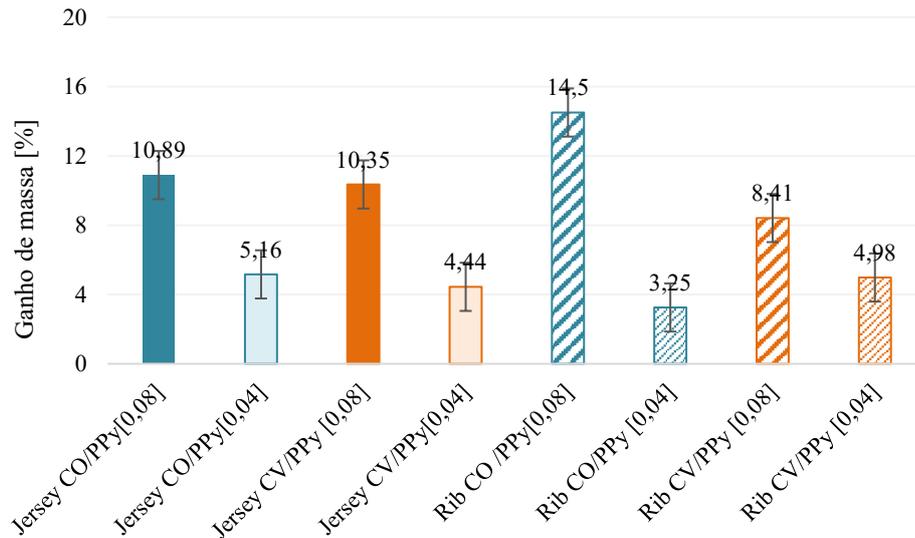
Os resultados obtidos na análise estrutural das malhas foram importantes para comparar os substratos fibrosos e correlacionar, posteriormente, o comportamento das malhas após a funcionalização superficial *in situ* a partir do polímero condutor. As propriedades analisadas nas malhas podem trazer o entendimento de como o tecido se comportará mediante o revestimento do polímero condutor. Por exemplo, a malha com maior gramatura apresenta a maior superfície disponível para a aplicação de polímero condutor. Da mesma forma, elevados valores relativos ao fator de cobertura e a densidade proporcionam uma superfície mais regular, o que pode promover uniformidade do revestimento e melhora na condutividade elétrica do substrato.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MALHAS RECOBERTAS COM PPy

### 4.2.1 Avaliação do revestimento

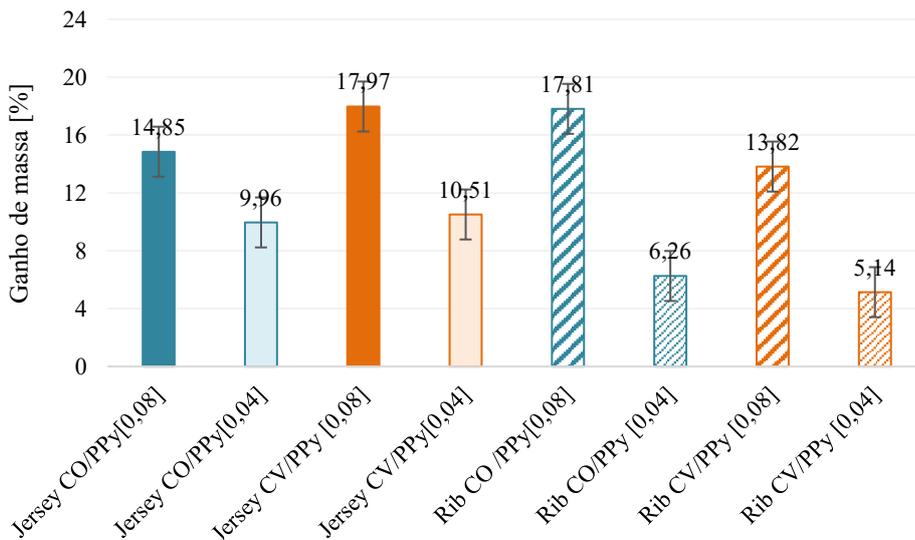
Após o processo de polimerização *in situ* das malhas de jersey e rib de CO e CV e afim de verificar as melhores condições de polimerização, foram realizados a medição do ganho de massa das malhas a partir do revestimento com PPy em função da concentração do monômero durante os tempos de 30 e 60 minutos (Figura 17 e Figura 18).

Figura 17 – Ganho de massa das malhas revestidas com PPy – 30 minutos



Fonte: Próprio autor

Figura 18 – Ganho de massa das malhas revestidas com PPy – 60 minutos



Fonte: Próprio autor

A análise do ganho de massa revelou que, em 30 minutos, a amostra rib de CO apresentou o maior ganho de massa, de cerca de 14,5%, enquanto em 60 minutos, a amostra jersey de CV teve um ganho de aproximadamente 18,0%. Constatou-se que tanto o tempo quanto a concentração de monômero influenciam diretamente no ganho de massa das amostras. Não foi observada uma tendência clara de ganho de massa relacionada à estrutura ou matéria-prima. No entanto, a estrutura rib, devido as ranhuras decorrentes da própria estrutura, e apresentar maior fator de cobertura, gramatura e espessura em comparação com o jersey, acumulou mais PPy, pois possui uma área de contato maior para o PPy se acumular, resultando

em um maior ganho de massa em menor tempo. Ressalta-se que a estrutura jersey, aos 60 minutos, apresentou um ganho de massa significativo.

Cabe aqui mencionar que o polímero condutor ao ser depositado sobre a superfície da malha apresenta a mudança de coloração devido ao processo químico sofrido de polimerização. Conforme Mohamed et al. (2021), o PPy, ao sofrer o processo de oxidação a partir da adição de uma agente oxidante, passa a adquirir coloração escura. Com isso o substrato, ao receber o revestimento de PPy, apresentou mudança de cor assumindo tonalidade preta.

Na análise visual da superfície das malhas revestidas, observou-se qualitativamente que há a presença do PPy aderido à superfície não ocorrendo desprendimento de partículas de PPy da superfície durante o manuseamento. Assim, a escolha da melhor condição foi realizada a partir da análise de tempo de polimerização (30 e 60 minutos), ganho de massa e condutividade. Esses critérios foram baseados nos trabalhos de Medeiros et al. (2012) e Baik et al. (2019), que apresentam que o ganho de massa está diretamente ligado à maior condutividade do material. Portanto, as amostras de 60 minutos de polimerização e com a condição PPy<sub>[0,08]</sub> demonstraram maior quantidade de polímero na superfície sugerindo apresentaram no futuro maior condutividade, que foram utilizadas nas demais etapas dessa pesquisa.

#### 4.2.2 Ensaio de condutividade de 4 pontas

Realizou-se o ensaio de condutividade elétrica pelo método de quatro pontas das malhas funcionalizadas superficialmente com PPy, de acordo com os resultados reportados na Tabela 7.

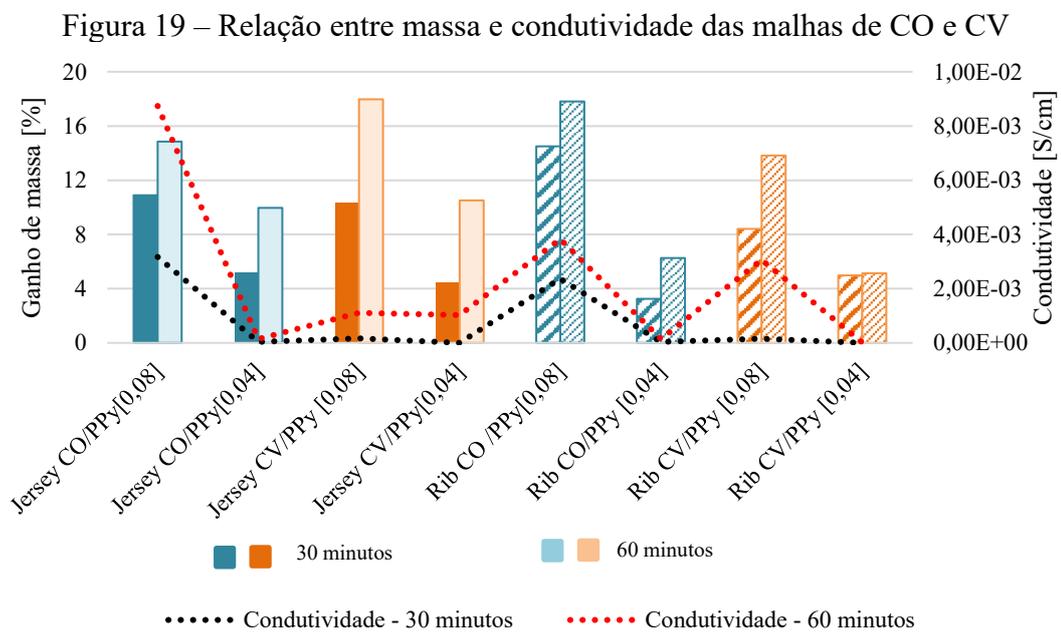
Tabela 7 – Análise de condutividade de 4 pontas das malhas revestidas com PPy

Condição	Condutividade [S/cm]			
	30 min.	Desvio padrão	60 min.	Desvio Padrão
Jersey CO/PPy <sub>[0,08]</sub>	$3,17 \times 10^{-3}$	$2,7 \times 10^{-3}$	$5,57 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-4}$
Jersey CO/PPy <sub>[0,04]</sub>	$3,33 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$1,12 \times 10^{-4}$	$8,2 \times 10^{-3}$
Jersey CV/PPy <sub>[0,08]</sub>	$1,71 \times 10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-5}$	$9,40 \times 10^{-4}$	$6,7 \times 10^{-4}$
Jersey CV/PPy <sub>[0,04]</sub>	$1,40 \times 10^{-6}$	$9,8 \times 10^{-7}$	$1,02 \times 10^{-3}$	$5,4 \times 10^{-4}$
Rib CO/PPy <sub>[0,08]</sub>	$2,37 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$1,46 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-4}$
Rib CO/PPy <sub>[0,04]</sub>	$3,33 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	$1,12 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-6}$
Rib CV/PPy <sub>[0,08]</sub>	$1,58 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$2,91 \times 10^{-3}$	$4,5 \times 10^{-4}$
Rib CV/PPy <sub>[0,04]</sub>	$1,75 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-5}$	$3,9 \times 10^{-6}$

A funcionalização das malhas de CO e CV com PPy após os tempos de 30 minutos e 60 minutos, resultou em um aumento significativo da condutividade em relação aos tecidos sem

tratamento. Esse resultado confirmou a eficácia da técnica de revestimento, conferindo a propriedade de condução elétrica nas fibras têxteis. Ao comparar os dois tipos de malha, observa-se uma diferença na magnitude do aumento após a polimerização. As amostras de algodão demonstraram uma resposta mais expressiva em termos de aumento da condutividade em comparação com as amostras de viscose, o que sugere que o algodão pode ser mais suscetível à funcionalização com PPy, podendo ser justificada pela estrutura molecular e aos grupos funcionais, C-O e O-H, característicos da celulose e no Py e propriedades superficiais.

Na Figura 19 é apresentada a relação entre a massa e a condutividade das malhas de CO e CV.



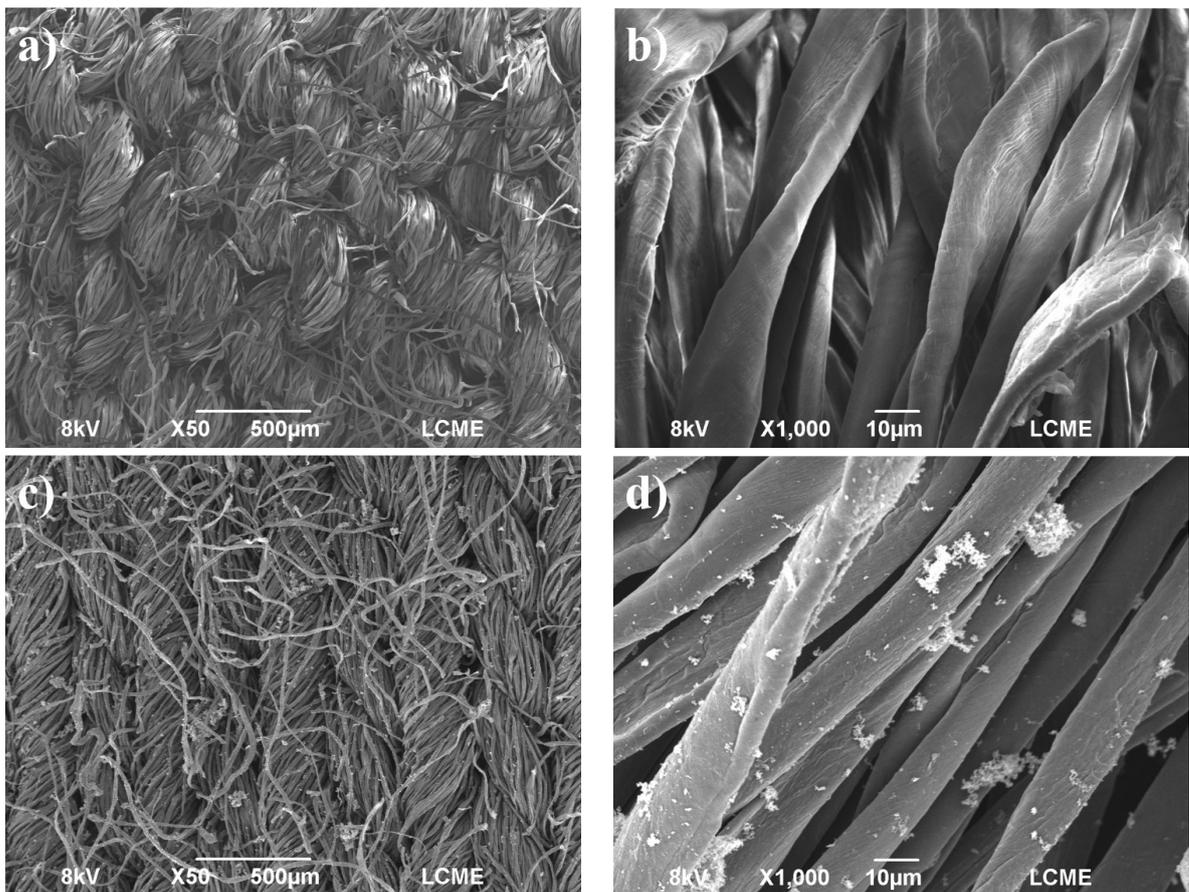
Fonte: Próprio autor

Há uma relação entre o aumento de condutividade nas amostras em função do tempo e do ganho de massa. Quando há um acréscimo na massa do polímero condutor na superfície da malha, as partículas estão mais próximas aumentando a condução de corrente elétrica, o que pode implicar em uma maior quantidade de portadores de carga disponíveis para o transporte de elétrons, resultando em uma condutividade elétrica mais eficiente. Além disso, o aumento do tempo de polimerização pode aumentar o grau de dopagem do polímero, fator que também influencia no ganho de condutividade elétrica. Essa relação é fundamental para a otimização do desempenho e eficiência de sistemas elétricos que dependem de malhas condutoras (Baik et al., 2019; Gao et al., 2022; Hebeish et al., 2016). Após a análise do ganho de massa e sua relação com a condutividade, destacaram-se as malhas de jersey de CO/PPy<sub>[0,08]</sub> e rib de CV/PPy<sub>[0,08]</sub>, polimerizadas durante 60 minutos.

### 4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A superfície e morfologia das malhas foram analisadas antes e após da polimerização *in situ* a partir do MEV. Na Figura 20 é apresentada a estrutura da malha jersey de CO/PPy<sub>[0,08]</sub> antes (a e b) e depois da deposição do PPy (c e d). Observa-se que o PPy foi depositado sobre as fibras de algodão, com a presença de fibrilas soltas após a polimerização. Esse fenômeno pode ser resultado da agitação durante o processo de polimerização *in situ*, que provoca o desprendimento das fibrilas.

Figura 20 – MEV da estrutura jersey CO: antes (a) e b) e após a funcionalização (c) e (d) CO/PPy<sub>[0,08]</sub> – 60 minutos

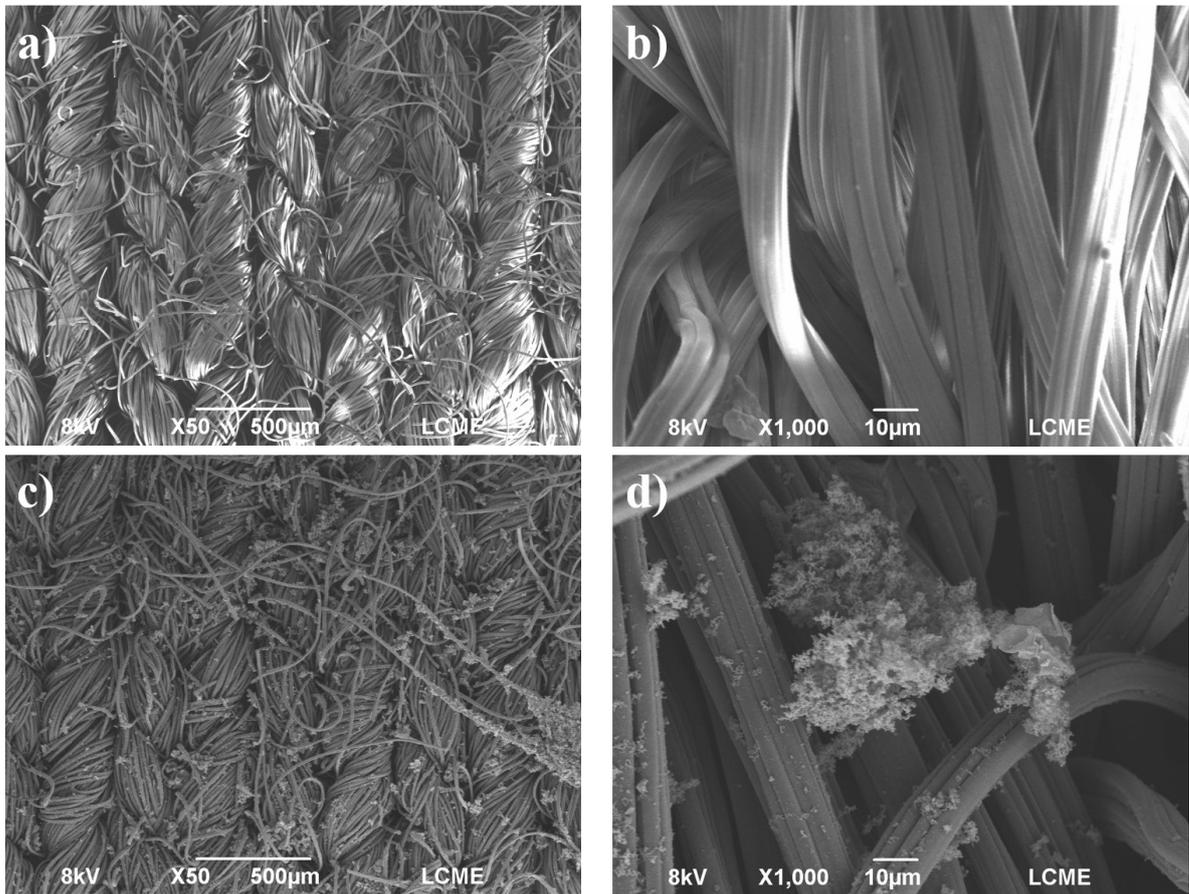


Fonte: Próprio autor

A Figura 21 apresenta o MEV da malha jersey de CV antes e após o revestimento com PPy, na condição de CV/PPy<sub>[0,08]</sub>. Em 21-a e 21-b é possível verificar a estrutura jersey e a morfologia da fibra de CV. Ao adicionar o PPy, observa-se a distribuição do polímero ao longo da superfície da estrutura (21-c) e alguns aglomerados de PPy sobre a fibra (21-d). Comparando o MEV das duas matérias-primas (CO e CV), não é possível verificar diferença na morfologia

das fibras revestidas com o PPy, uma vez que ambas são compostas majoritariamente por celulose.

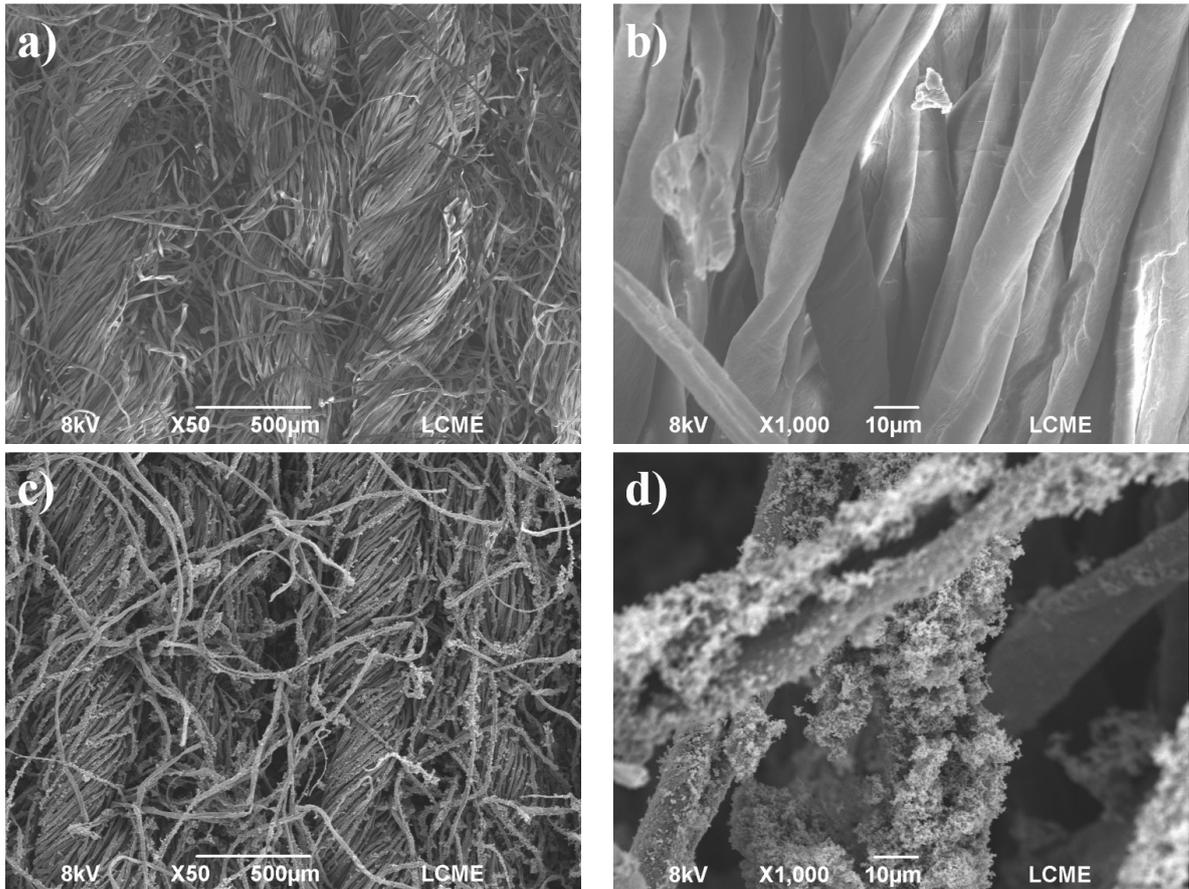
Figura 21 – MEV da estrutura jersey CV: antes (a) e b) e após a funcionalização (c) e (d) CV/PPy<sub>[0,08]</sub> – 60 minutos



Fonte: Próprio autor

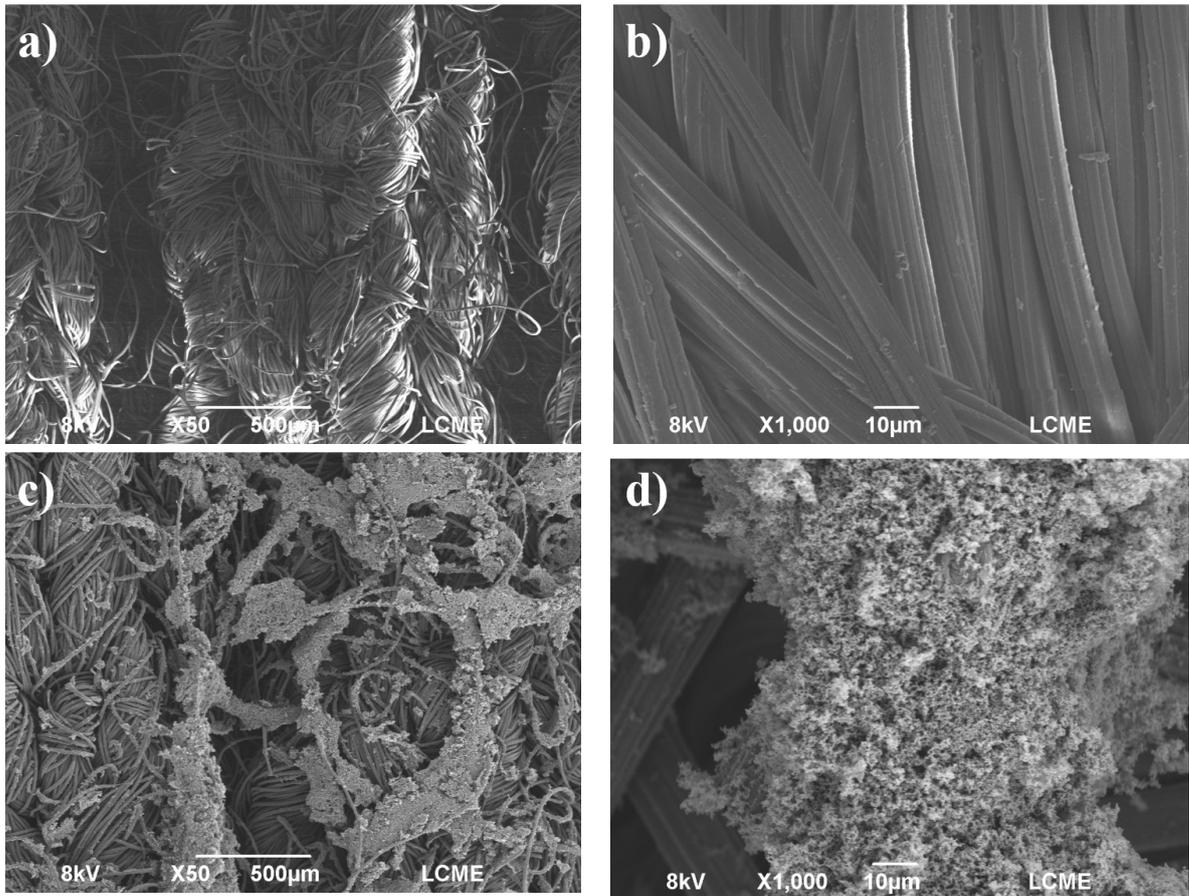
As imagens das Figura 22 e Figura 23 apresentam o MEV das estruturas de rib de CO e CV, respectivamente. As Figuras 22-a e 22-b mostram a estrutura e a morfologia da fibra de CO antes da polimerização, enquanto as imagens 22-c e 22-d apresentam a condição do rib de CO/PPy<sub>[0,08]</sub>. Observa-se nas imagens a distribuição e aglomerados do PPy na superfície da malha, e nota-se a presença mais acentuada de PPy se comparado à estrutura jersey, o que pode ser justificado pela própria estrutura rib que possui maior gramatura, fator de cobertura e espessura, conforme avaliado na caracterização estrutural, permitindo a deposição de uma maior quantidade de PPy. Em 23-c e 23-d, que representa o CV/PPy<sub>[0,08]</sub>, é ainda mais evidente a incidência de PPy acumulado sobre a superfície. Na caracterização estrutural, a gramatura e o fator de cobertura do rib CV são maiores do que os do rib de CO, o que pode justificar a alta densidade depositada sobre sua superfície. Conforme citado anteriormente, a gramatura e o fator de cobertura estão associados à área de contato, garantindo a adesão do PPy.

Figura 22 – MEV da estrutura rib CO: antes (a) e b) e após a funcionalização (c) e (d)  
CO/PPy<sub>[0,08]</sub> – 60 minutos



Fonte: Próprio autor

Figura 23 – MEV da estrutura rib CV: antes (a) e b) e após a funcionalização (c) e (d)  
CV/PPy<sub>[0,08]</sub> – 60 minutos



Fonte: Próprio autor

Após as análises morfológicas das malhas, observa-se que em relação à matéria-prima não há diferença clara quanto à interação com o polímero condutor. Isso pode ser justificado pelo fato de que ambas as malhas são constituídas por celulose em sua composição. No entanto, em relação à estrutura, a estrutura rib, devido às ranhuras em sua superfície, demonstrou uma maior distribuição de partículas.

#### 4.2.4 Espectroscopia infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A análise do FTIR foi realizada antes e depois da polimerização *in situ* do PPy nas malhas de CO e CV com o intuito de comparar o comportamento das ligações químicas. Na Figura 24 são observadas as curvas de FTIR da malha jersey CO e CO/PPy<sub>[0,08]</sub>. Verifica-se que no espectro do FTIR da curva de CO há bandas a 3320 cm<sup>-1</sup>, 1644 cm<sup>-1</sup> e 1031 cm<sup>-1</sup>, referentes aos grupos funcionais C-O e O-H, respectivamente, característicos das fibras de algodão. De acordo com Abidi e Manike (2018), a banda em aproximadamente 1620 cm<sup>-1</sup> caracteriza a adsorção da água presente na fibra a partir da flexão da ligação O-H. Este estudo também identifica uma banda em 897 cm<sup>-1</sup>, que está relacionada às ligações C-O, presentes na celulose

das fibras de algodão. Além disso, observa-se uma banda de maior intensidade em aproximadamente  $3000\text{ cm}^{-1}$ , atribuída ao estiramento O-H, indicando uma forte interação intermolecular que está associada à cristalinidade presente na amostra.

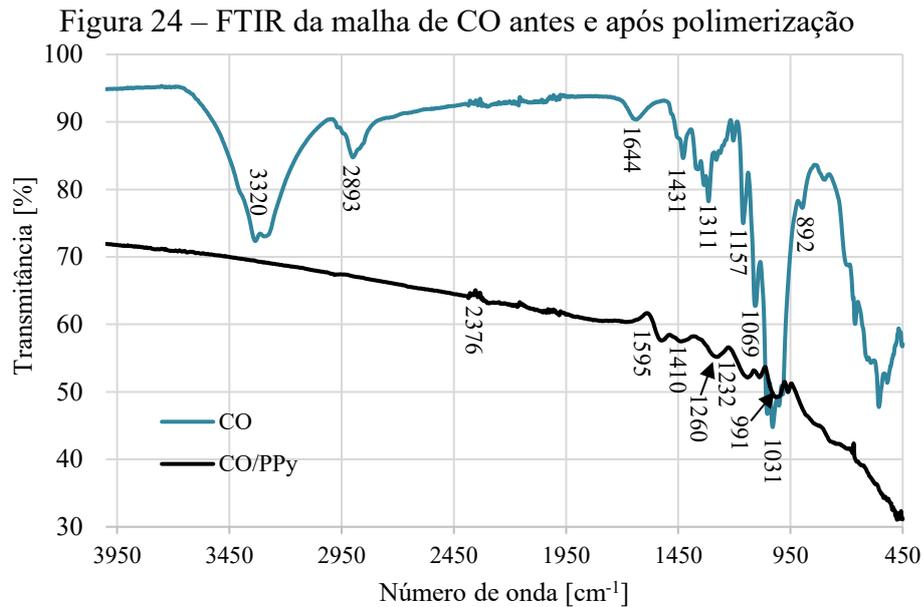
Em outro trabalho de Abidi et al. (2014) é descrito que a banda em aproximadamente  $3336\text{ cm}^{-1}$  representa vibrações decorrentes das ligações de hidrogênio na celulose, no qual é atribuído à ligação de hidrogênio intramolecular de celulose. Os picos intermediários entre  $1600$  e  $1700\text{ cm}^{-1}$  representam o índice de cristalinidade da celulose e os picos presentes entre  $1150$  e  $1010\text{ cm}^{-1}$  representam vibrações atribuídas às moléculas não celulósicas. Liu (2013) descreve em sua pesquisa que devido à formação das macromoléculas de celulose, observa-se no espectro de FTIR vibrações e picos que são relacionados ao aumento da porção ordenada ou cristalina da celulose e água adsorvida em seu interior, características que descrevem o comportamento da fibra de CO na análise de FTIR.

No espectro de FTIR do CO/PPy<sub>[0,08]</sub>, observa-se diversas mudanças significativas se comparado ao CO não tratado. Observou-se a redução de vibração nas bandas de  $991\text{ cm}^{-1}$  e  $1595\text{ cm}^{-1}$  que são relacionados à vibração dos grupos C-O e C=O, que representam a água adsorvida e a presença de celulose na amostra. Além disso, não é observado a vibração de alongamento dos grupos O-H que caracteriza a cristalinidade do CO na banda  $3320\text{ cm}^{-1}$ .

O PPy possui grupos funcionais característicos em sua estrutura cujas bandas se sobrepuseram sobre as bandas características do algodão, por exemplo entre  $1150\text{ cm}^{-1}$  e  $1000\text{ cm}^{-1}$  houve a deformação do grupo C-H no anel pirrol. Entre  $1500\text{ cm}^{-1}$  e  $1540\text{ cm}^{-1}$  houve o estiramento C=C e C-C do anel pirrol e entre  $3500\text{ cm}^{-1}$  e  $3300\text{ cm}^{-1}$  houve o estiramento de N-H devido à formação de pontes de hidrogênio (Yussuf et al., 2018). Quando se adiciona um polímero condutor à amostra de CO as mudanças ocorridas estão relacionadas ao surgimento de novas bandas de absorção, principalmente ligações de C-C e C-N, ligações características do PPy, redução da intensidade das bandas existentes, possível deslocamento de bandas ao longo do comprimento de onda e principalmente a alteração no estiramento que ocasiona a deformação da celulose.

Os fenômenos avaliados ocorrem devido a presença do polímero condutor na superfície que pode reduzir a intensidade das bandas espectrais existentes da celulose, sugerindo uma interferência na absorção de luz pela amostra. Também é possível observar o deslocamento de algumas bandas ao longo do espectro de absorção, indicando alterações na estrutura molecular ou na interação entre os componentes. Outra consequência da interação entre o PPy e o CO é a alteração no estiramento molecular da celulose, levando à sua

deformação que sugere que o polímero condutor pode modificar as propriedades físicas e estruturais da celulose oxidada. Essas mudanças podem ser associadas ao revestimento aderido na superfície e entre as fibras da malha. Tais mudanças causam efeitos nas propriedades do algodão como condutividade, maior estabilidade térmica e alteração da absorção de umidade (Al-Oqla et al., 2015; Ferreira; Ferreira; Fangueiro, 2018; Yazici et al., 2022).



Fonte: Próprio autor

Na Tabela 8 é apresentado os comprimentos de onda e sua respectiva descrição de acordo com as curvas de FTIR da malha de CO da Figura 24.

Tabela 8 – Número de onda FTIR da malha rib de CV e CV/PPy<sub>[0,08]</sub>

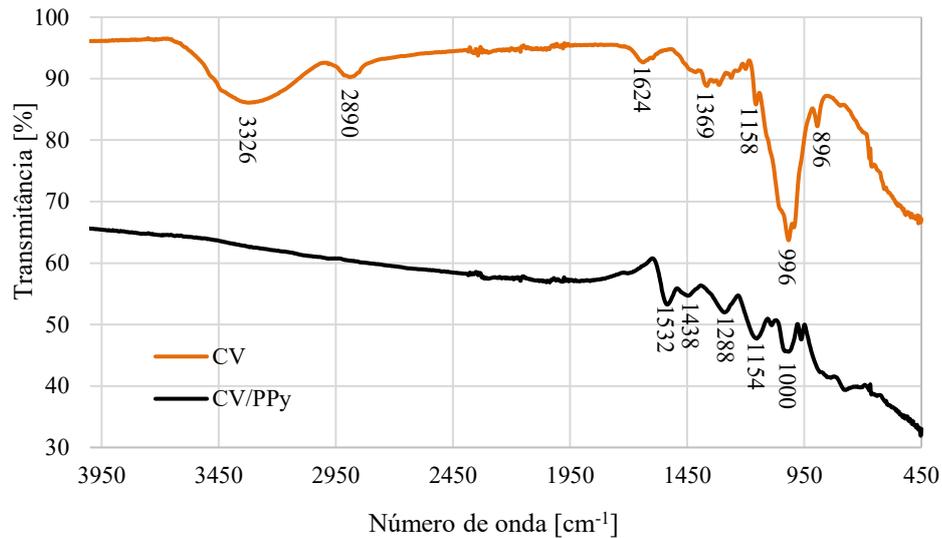
Amostra	Número de onda [cm <sup>-1</sup> ]	Descrição
CO	892	Vibrações de estiramento fora do plano da ligação C1-H no anel de glicose, característica da estrutura β-glicosídica
	1031	Vibrações de C-O de álcoois e fenóis
	1069	
	1157	Vibrações de estiramento C-O na estrutura da celulose
	1311	Deformação O-H em plano
	1431	Vibrações de deformação CH <sub>2</sub>
	1644	Vibração de deformação da água adsorvida (O-H)
	2893	Estiramento C-H, simétricas e assimétricas
3320	Vibrações do alongamento dos grupos hidroxila (OH)	
CO/PPy <sub>[0,08]</sub>	991	Deformação de C-H do anel pirrol
	1232	Vibrações de estiramento C-H fora do plano e também a interações C-N e C-H
	1260	
	1410	Estiramento C-N do anel pirrólico
	1595	Vibrações de estiramento C=C e C=N do anel pirrólico
2376	Estiramento C-H aromáticas	

Na Figura 25 é apresentada a análise de FTIR da malha de CV e CV/PPy<sub>[0,08]</sub>. No espectro de CV são observadas as bandas nos comprimentos de ondas característicos da fibra de viscose que refletem a composição química e estrutura molecular do material. A banda em 3326 cm<sup>-1</sup> é atribuída ao estiramento axial da O-H em grupos aromáticos e alifáticos, enquanto o pico em 2890 cm<sup>-1</sup> caracteriza o estiramento axial da ligação C-H. Além disso, a banda em 1624 cm<sup>-1</sup> é referente às vibrações C=O de amida.

Foram observadas bandas específicas do CV, em 996 cm<sup>-1</sup>, por exemplo, que se refere ao estiramento de C-O associada às mudanças estruturais na celulose ocasionada pelo processo de regeneração. Em 896 cm<sup>-1</sup>, estiramento de C-H, verificou-se as bandas que refletem a conformação do anel de glicose e interações intermoleculares alteradas pela regeneração. Mia et al. (2022) e Peets et al. (2019) descrevem os picos característicos do tecido da fibra de viscose a aproximadamente 3320 cm<sup>-1</sup>, que representam estrutura de celulose, e outros estiramentos principalmente nos comprimentos de onda em 1405 cm<sup>-1</sup> e 1110 cm<sup>-1</sup> que também caracterizam a amostra analisada como uma viscose. Tais bandas descritas estão em conformidade ao observado na amostra de malha de CV analisada.

Assim como na malha de algodão observa-se uma mudança significativa nas bandas que caracterizam a celulose presente na fibra. O comportamento da malha de CV revestida com PPy observados no espectro de FTIR foi semelhante ao encontrado nas malhas condutoras de algodão, devido à sua composição ser predominantemente celulose.

Figura 25 – FTIR da malha de CV antes e após polimerização



Fonte: Próprio autor

Na Tabela 9 é apresentado os comprimentos de onda referente à malha de CV apresentados na curva de FTIR da Figura 25.

Tabela 9 – Número de onda FTIR da malha rib de CV e CV/PPy<sub>[0,08]</sub>

Amostra	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	Descrição
CV	896	Vibrações de estiramento fora do plano da ligação C1-H no anel de glicose, característica da estrutura β-glicosídica
	996	Estiramento C-O na estrutura da celulose
	1158	
	1369	
	1624	Vibração de deformação (bending) da água absorvida
	2890	Vibrações de estiramento das ligações hidrogênio O-H, similar à celulose natural
	3326	Vibrações de estiramento das ligações hidrogênio O-H, similar à celulose natural
CV/PPy <sub>[0,08]</sub>	1000	Deformação de C-H do anel pirrol
	1154	Vibrações de estiramento C-H fora do plano e também a interações C-N e C-H
	1288	
	1438	Estiramento C-N do anel pirrólico
	1532	Vibrações de estiramento C=C e C=N do anel pirrólico

#### 4.2.5 Ensaio de tração das malhas antes e após a polimerização com PPy

Foi realizado o ensaio de tração nas malhas de jersey CO e rib CV antes e após a funcionalização com o PPy. Na Tabela 10 é apresentado um breve resumo do comportamento mecânico das malhas antes e após a funcionalização. A Figura 26 são apresentados os principais resultados em relação à tensão a ruptura, módulo de elasticidade e alongamento da malha de algodão antes e depois da polimerização com PPy.

Observa-se que há uma diferença muito pequena na tensão de ruptura ao comparar a malha jersey CO com a jersey CO/PPy<sub>[0,08]</sub>, enquanto a malha revestida apresenta o dobro do módulo de elasticidade. O módulo de elasticidade está ligado diretamente à rigidez do material, o que mostra que o jersey CO/PPy<sub>[0,08]</sub> é mais rígido que o CO. Outro fator que influencia a rigidez é a estrutura da malha. A malha jersey, devido a sua construção, naturalmente não apresenta muita elasticidade, tornando-o mais rígido que outra a estrutura de malha rib.

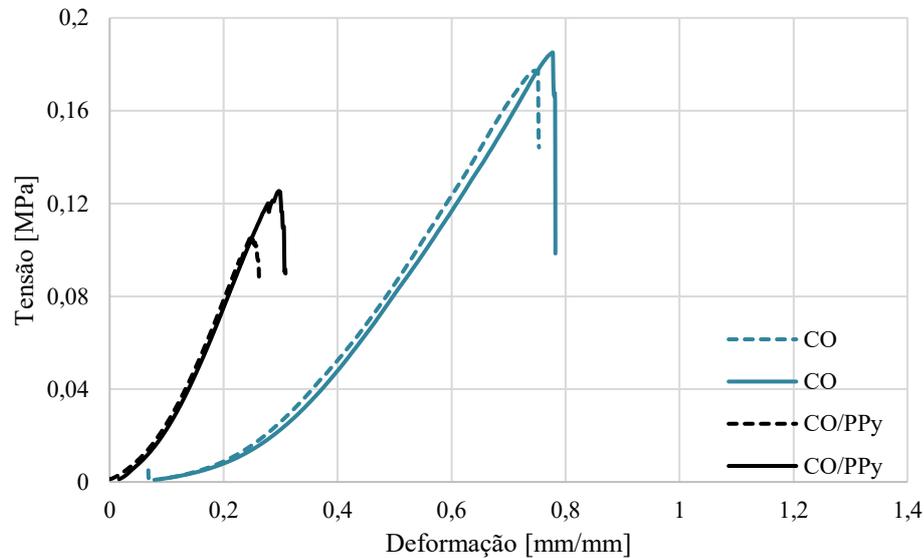
Quanto ao alongamento, ele está relacionado à redução percentual na área, na qual avalia-se o grau de deformação plástica até a fratura o que se pode associar à fragilidade do material. No ensaio de tração, observou-se um decréscimo no alongamento da malha CO/PPy<sub>[0,08]</sub> de cerca de 36 % em relação à malha CO, concluindo-se que ao revestir a malha, ela se tornou mais frágil que antes da funcionalização.

Vários aspectos podem impactar as propriedades mecânicas da malha tratada, como o processo de polimerização, a estrutura da malha e o impacto da funcionalização sobre a fibra de algodão, resultando em uma redução na flexibilidade da malha, e reduzindo sua resistência à tração. Além disso, a adesão entre o polímero condutor e as fibras de algodão pode não ser homogênea, criando pontos fracos na estrutura e causando uma distribuição desigual de forças durante o ensaio de tração. As propriedades intrínsecas do PPy, como rigidez, deformação e ductilidade, também exercem influência sobre o comportamento mecânico da malha.

Tabela 10 – Valores obtidas do ensaio de tração das amostras de jersey de CO e rib de CV antes e após a funcionalização

Amostras	Tensão de ruptura [MPa]	Módulo de Elasticidade [MPa]	Alongamento [%]
CO	0,16 ± 0,04	0,30 ± 0,01	40,41 ± 0,05
CO/PPy <sub>[0,08]</sub>	0,12 ± 0,01	0,55 ± 0,01	25,70 ± 0,10
CV	0,16 ± 0,02	0,22 ± 0,08	95,08 ± 0,03
CV/PPy <sub>[0,08]</sub>	0,15 ± 0,02	0,30 ± 0,01	87,40 ± 0,10

Figura 26 – Comportamento de tração da malha jersey de CO antes e após polimerização



Fonte: Próprio autor

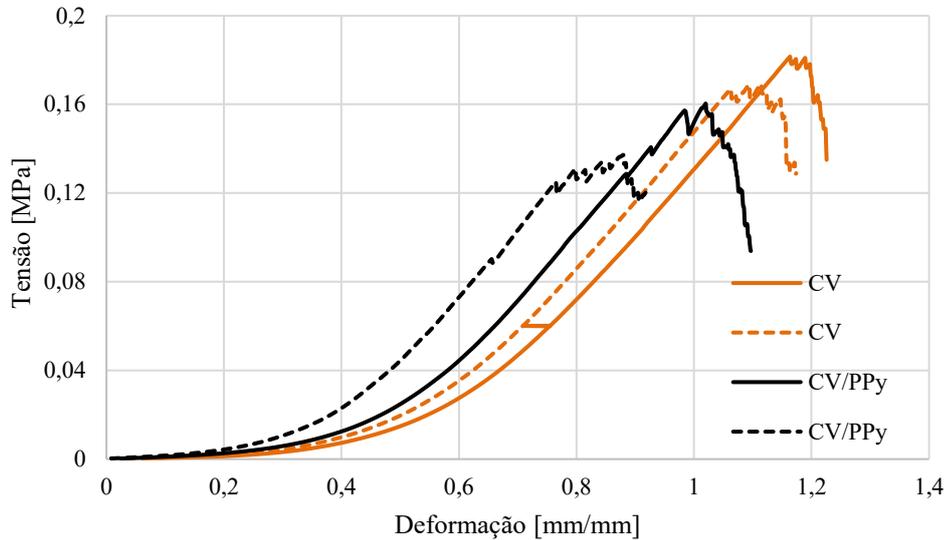
Lee e Park (2019) estudaram as propriedades mecânicas do tecido de algodão e o PPy durante o processo de polimerização. Observou-se a redução da resistência à tração em todas as condições analisadas devido à degradação das propriedades mecânicas pelo agente oxidante  $\text{FeCl}_3$  utilizado na polimerização do polímero. Os autores ainda afirmam que o substrato ao ser tratado com o PPy apresenta uma camada de polímero condutor em sua superfície, que aumenta a força de ligação entre o tecido de algodão e o PPy. Deogaonkar et al. (2014), explicam em sua pesquisa, que o agente oxidante  $\text{FeCl}_3$  durante a polimerização do pirrol forma  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  e  $\text{HCl}$  devido à hidrólise da solução que ataca as fibras de algodão degradando as propriedades mecânicas. Com isso, é confirmado o comportamento observado nas análises das malhas funcionalizadas apresentadas na Figura 27.

O aumento do módulo de elasticidade observado nas amostras pode ser justificado pelo próprio processo de funcionalização com agente oxidante e pela estrutura do substrato. Lee e Park (2019) descrevem que a rigidez de um tecido é afetada por vários fatores, como elasticidade inicial, características do fio, composição e gramatura, bem como espessura do tecido. Além disso, o polipirrol é conhecido como uma substância rígida com estruturas de ligação dupla conjugada. Assim, as partículas formadas a partir do processo de polimerização do pirrol podem se dispersar até mesmo dentro das fibras, formando camadas condutoras rígidas que restringem o movimento dos fios, tornando o substrato mais rígido que o tecido sem tratamento (Lee; Park, 2019).

De acordo com os resultados obtidos apresentados na Figura 27, não se observa alteração na tensão de ruptura e nem aumento no módulo elasticidade, demonstrando que a

malha rib CV/PPy<sub>[0,08]</sub> apresentou comportamento mecânico inalterado ao rib antes da funcionalização. Quanto ao alongamento, a estrutura de malha revestida de CV apresentou uma redução de cerca de 8% relação à malha não revestida, sendo uma alteração muito pequena.

Figura 27 – Ensaio de tração malha de rib CV antes e após polimerização



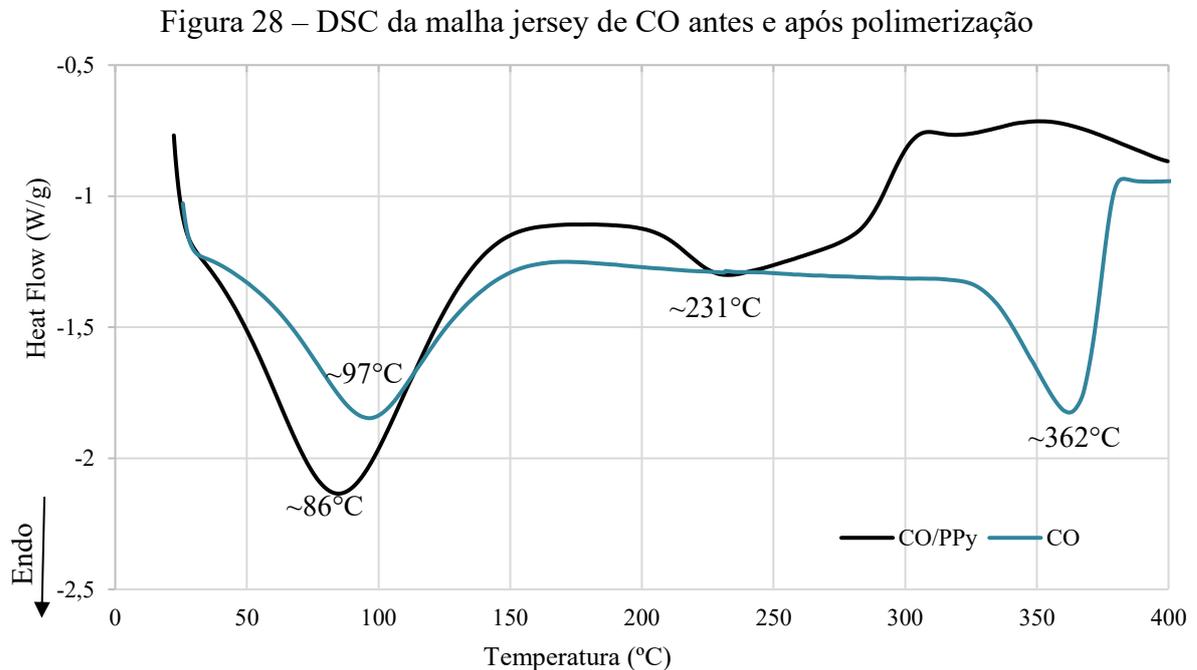
Fonte: Próprio autor

Na literatura são encontrados estudos que confirmam o comportamento mecânico da malha de viscose após a polimerização com o polímero condutor. Bashir et al. (2011) descreveram que as propriedades mecânicas, principalmente a resistência à ruptura e a rigidez, são afetadas pelo tratamento oxidante sofrido pelo substrato durante a polimerização *in situ*. Os autores ainda afirmam que devido à natureza ácida da solução de FeCl<sub>3</sub> e a reação dos grupos funcionais (O-H) e (-Na<sup>+</sup>S<sup>-</sup>) causam a hidrólise ácida nas fibras de viscose. Assim, essas reações tornam as fibras mais cristalinas e frágeis, resultando na redução da resistência e flexibilidade do substrato têxtil. Dall'Acqua et al. (2004) demonstraram o comportamento mecânico de diferentes fibras naturais e artificiais, especialmente a viscose e observaram uma redução na resistência à ruptura e aumento da rigidez em consequência da funcionalização e das reações químicas que ocorrem durante o processo. O mesmo comportamento não foi observado nas malhas analisadas o que se pode concluir que o revestimento afetou minimamente o comportamento mecânico da malha de CV.

#### 4.2.6 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

As análises de DSC foram realizadas nas amostras de malha de CO e CV antes e após 60 minutos de polimerização com objetivo de avaliar o comportamento dessas malhas mediante

a polimerização *in situ* do polipirrol. Na Figura 28 é apresentado o gráfico da análise do DSC das fibras de CO com e sem polímero condutor.



Fonte: Próprio autor

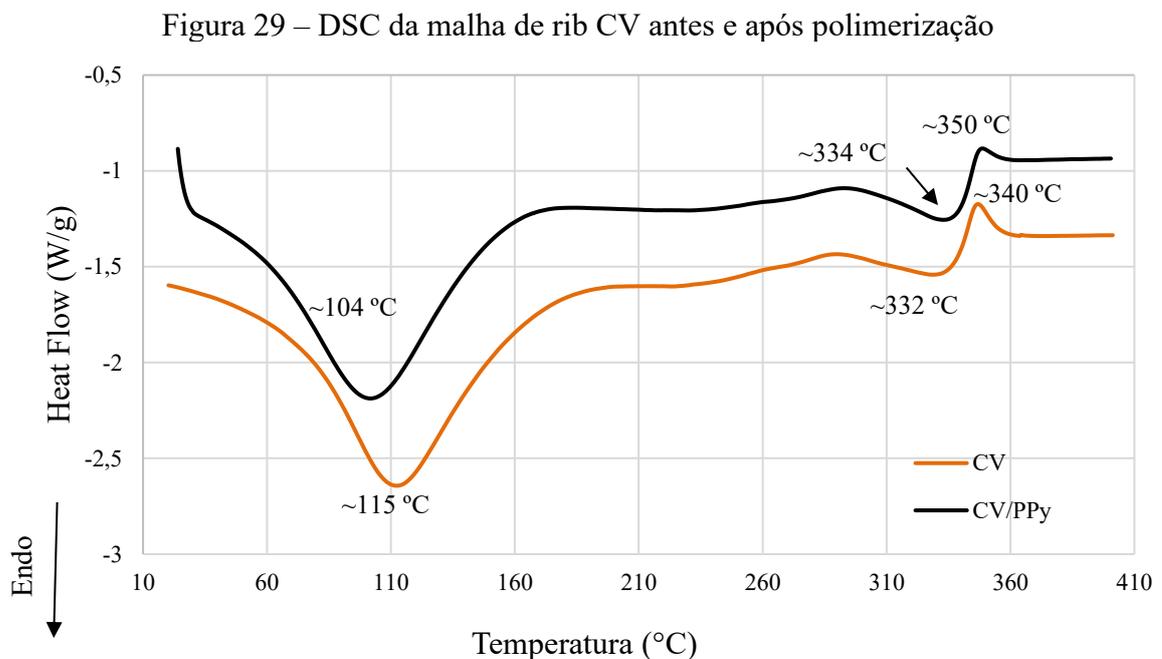
Conforme observado nas curvas do gráfico de DSC da malha de algodão antes da funcionalização, há a presença de dois picos endotérmicos preponderantes nas temperaturas de 97 °C e 362 °C. O pico de 97 °C é relativo à perda de água e remoção de umidade sofrida pela amostra devido à características de elevada hidrofiliidade da fibra de algodão. Durante o aquecimento o algodão sofre uma mudança significativa que pode estar relacionado à decomposição térmica da celulose na temperatura de 362 °C. Durante o ciclo de aquecimento, as fibras de algodão exibem um comportamento esperado, pois, sendo um material semicristalino, não passam pelos processos de mudança de fase, fusão ou cristalização. O mesmo comportamento é visto na literatura em Alharbi et al. (2022), que mostra que antes do tratamento com quitosana a fibra de algodão não exhibe picos endotérmicos além dos observados em torno de 100 °C e 300 °C, esses resultados sugerem que não houve mudança de fase. Campos et al. (2017) também mostraram que o tecido de algodão, antes do tratamento, apresentou perda de umidade em torno de 100 °C e despolimerização da celulose em 380 °C, indicando um comportamento térmico típico das fibras naturais.

Comparando as curvas da malha de CO e CO/PPy, esta última que representa a malha tratada superficialmente com polímero condutor PPy. Observa-se que o pico de perda de água foi mais acentuado e com menor temperatura, aproximadamente 86 °C. Além disso, o pico

relativo à despolimerização da celulose, que estava muito evidente na curva da malha de CO, não foi observado no tecido tratado com PPy, devido a degradação do PPy na temperatura de 231 °C, afetando a estabilidade térmica do algodão devido a alteração da temperatura de decomposição da fibra. O PPy atuou como barreira protetiva da malha de algodão, retardando a sua degradação. O revestimento superficial de uma fibra celulósica com um polímero condutor também pode afetar as propriedades de isolamento térmico, resultando em maior ou menor retenção de calor (Bahners et al., 2018; Liao et al., 2021).

Todos os fenômenos observados se devem pela mudança química na estrutura da malha de algodão a partir da interação entre os elétrons  $\pi$ -conjugados presentes nos polímeros condutores, nesse caso no polipirrol e a estrutura da fibra celulósica, podendo afetar as propriedades térmicas dos polímeros, conforme observado na análise de FTIR. As interações entre polímero condutor e fibra de algodão ocorrem a partir da formação de ligações químicas, na qual há uma alteração da estrutura molecular da estrutura da fibra e a modificação da polaridade superficial, o que ocasiona a alteração da absorção de calor pela fibra, a condutividade térmica e a estabilidade dimensional (Wang et al., 2020; Xia; Lu, 2010; Xia et al., 2016).

A análise de comportamento térmico a partir do DSC com e sem o revestimento do polipirrol foi analisada nas malhas de viscose, conforme pode ser visualizado na Figura 29.



Fonte: Próprio autor

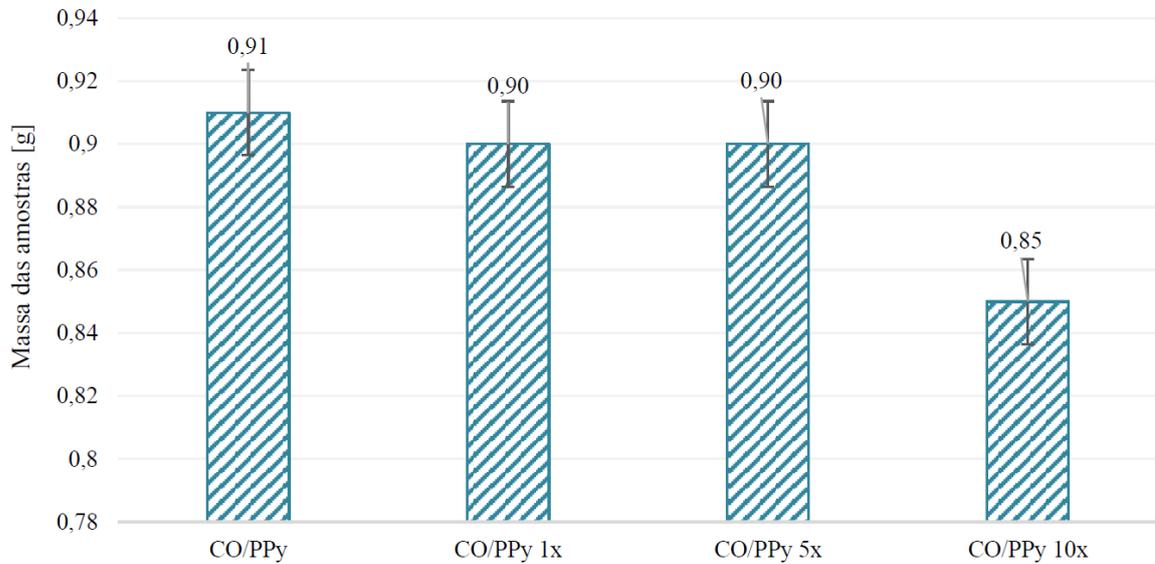
De acordo com os termogramas apresentados na Figura 29, há a presença de picos característicos do comportamento térmico da fibra de viscose. Assim, como na amostra de algodão, a viscose possui picos endotérmicos a 115 °C e 332 °C, que representam a perda de água e umidade e a decomposição da fibra de celulose, respectivamente. Nos estudos de Xu et al. (2007) e Carrillo et al. (2004) são observados comportamentos térmicos semelhantes na fibra de viscose.

Na curva da fibra de viscose tratada superficialmente com PPy observa-se um comportamento diferente do observado na fibra de algodão em presença de PPy. Quando se compara as curvas de rib CV e CV/PPy o comportamento térmico da viscose possui pouca diferença, mantendo-se a estabilidade térmica em relação à perda de água e decomposição da fibra de viscose. Porém, o comportamento da fibra de viscose com PPy é diferente da fibra de algodão com PPy, o que pode ser justificado pela própria estrutura da viscose, sua composição química, tratamento, processamento e porosidade (BASHIR et al., 2011; WANG et al., 2015). Além disso, ocorreu interações química e física entre a fibra de viscose e o PPy, uma vez que não foi observado uma mudança brusca do comportamento térmico da malha revestida com polímero condutor, apresentando alteração química e molecular da estrutura da fibra (Stuart et al., 2015).

#### 4.3 LAVAGEM DAS MALHAS FUNCIONALIZADAS COM PPy

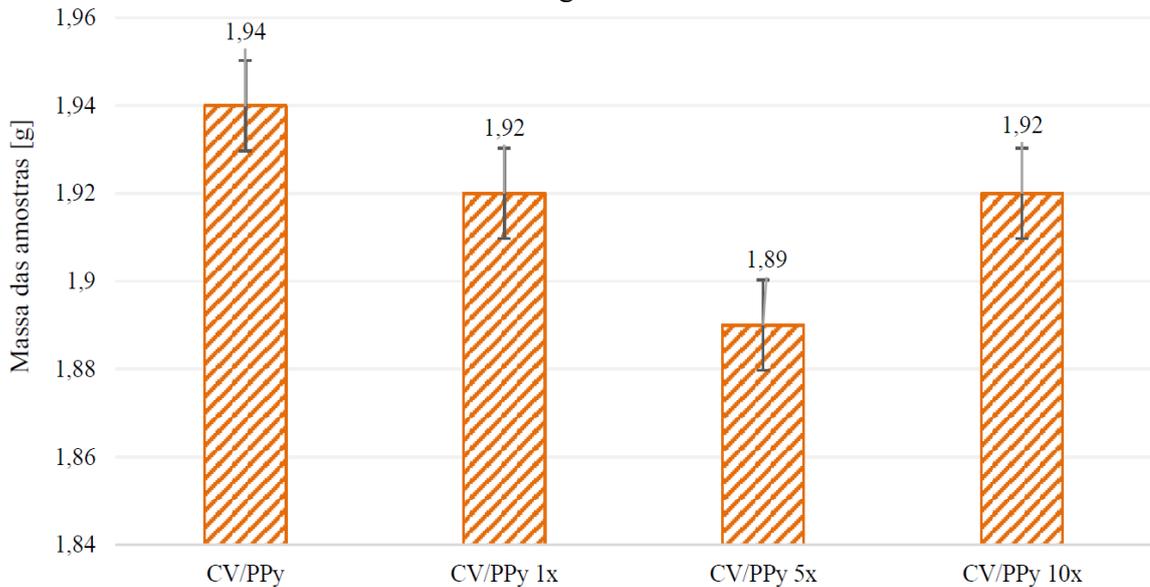
De modo a se verificar a eficácia e durabilidade do substrato funcionalizado com PPy, é crucial realizar uma análise da massa da malha antes e após o processo de lavagem. Este procedimento não apenas fornece dados sobre a eficiência da funcionalização, mas também ajuda a entender como a malha interage com agentes de limpeza e como isso pode afetar suas propriedades. Nas Figura 30 e Figura 31 são apresentadas as análises da massa das malhas funcionalizadas antes e após o ciclo de lavagem.

Figura 30 – Comportamento da malha jersey CO/PPy<sub>[0,08]</sub> antes e após diferentes ciclos de lavagem



Fonte: Próprio autor

Figura 31 – Comportamento da malha rib CV/PPy<sub>[0,08]</sub> antes e após diferentes ciclos de lavagem



Fonte: Próprio autor

Conforme observado nos gráficos, após a lavagem do substrato não foi observada uma redução da massa expressiva de cerca de 1 % e 7% para as amostras de jersey CO/PPy<sub>[0,08]</sub> e 1 % e 3 % nas amostras de rib CV/PPy<sub>[0,08]</sub> nos ciclos de lavagem de 1x, 5x e 10x. Tal resultado pode sugerir que houve uma interação química e física entre as fibras e o polímero condutor. Esta análise foi de grande importância, pois permitiu avaliar a estabilidade do revestimento funcional sob condições realistas de uso, comprovando a interação entre o substrato e o

polímero. Além disso, conforme observado nas análises de FTIR e DSC, as malhas de rib CV apresentam grupamentos específicos resultantes de seu processo de regeneração e picos de temperatura similares, o que confirma a interação entre a malha e o PPy o que justifica baixa perda de massa durante as lavagens da malha condutora. A análise de massa também contribui para determinar a vida útil esperada da malha funcionalizada, fornecendo informações sobre sua resistência após múltiplos ciclos de lavagem.

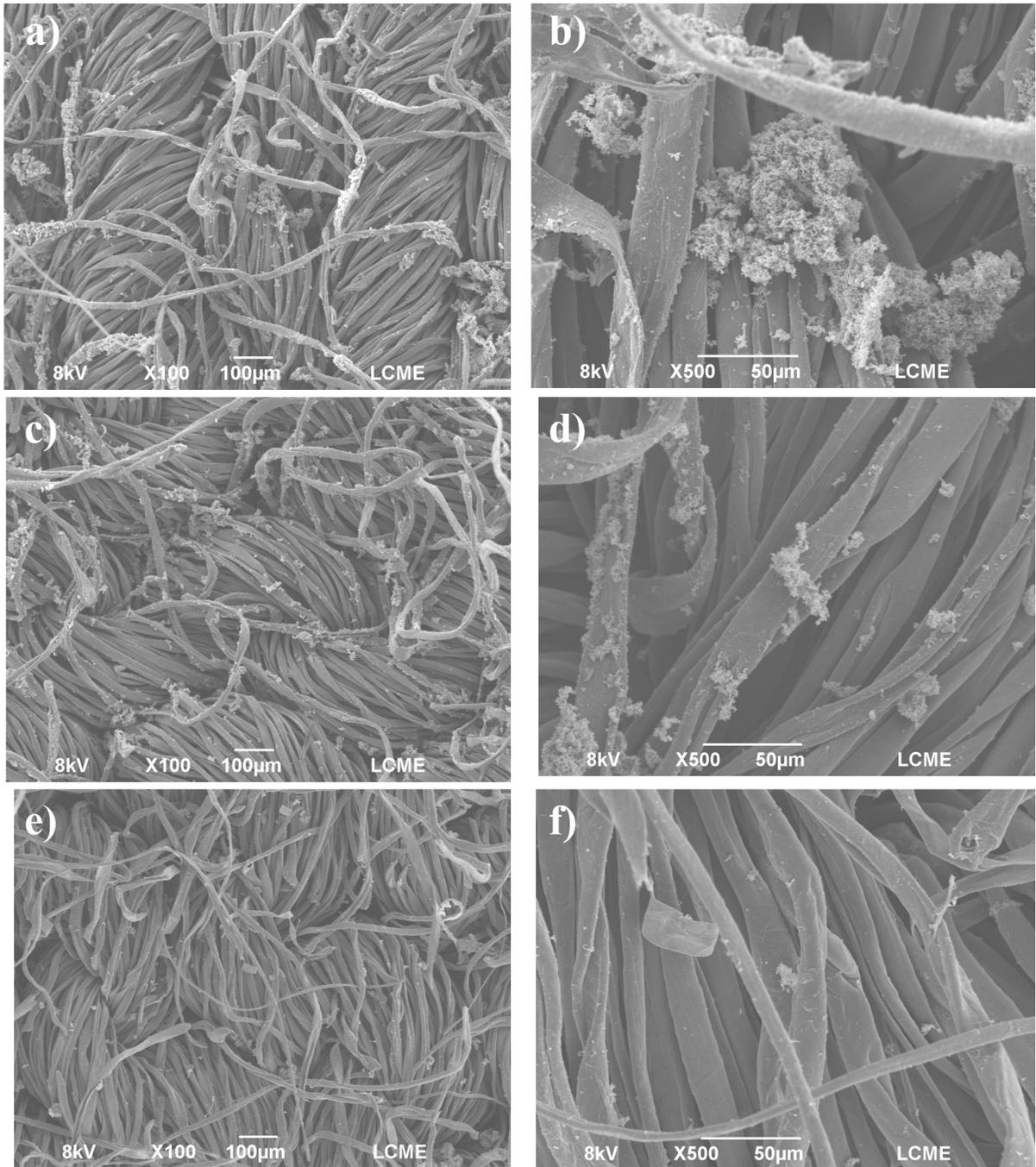
#### **4.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) após ciclos de lavagem**

Após a lavagem, foram realizadas análises da morfologia das malhas de jersey CO/PPy<sub>[0,08]</sub> e rib CV/PPy<sub>[0,08]</sub> para verificar a presença do PPy nas amostras, conforme apresentado nas Figura 32 e Figura 33. Apesar de ainda se observarem partículas na superfície da malha após os ciclos de lavagem, à medida que o número de ciclos aumenta, ocorre uma redução de PPy na superfície.

O processo de lavagem pode impactar a estabilidade das propriedades funcionais conferidas pelo polipirrol, tais como a condutividade elétrica, uma vez que esta depende da qualidade da funcionalização, da quantidade de partículas presentes na superfície e a resistência do polipirrol à lavagem (Xie et al., 2019). Quando uma malha composta por algodão e viscose é funcionalizada com PPy e submetida ao processo de lavagem, diversos resultados podem ser obtidos, os quais dependem de fatores com a técnica de funcionalização, as propriedades do polipirrol e os métodos de lavagem utilizados.

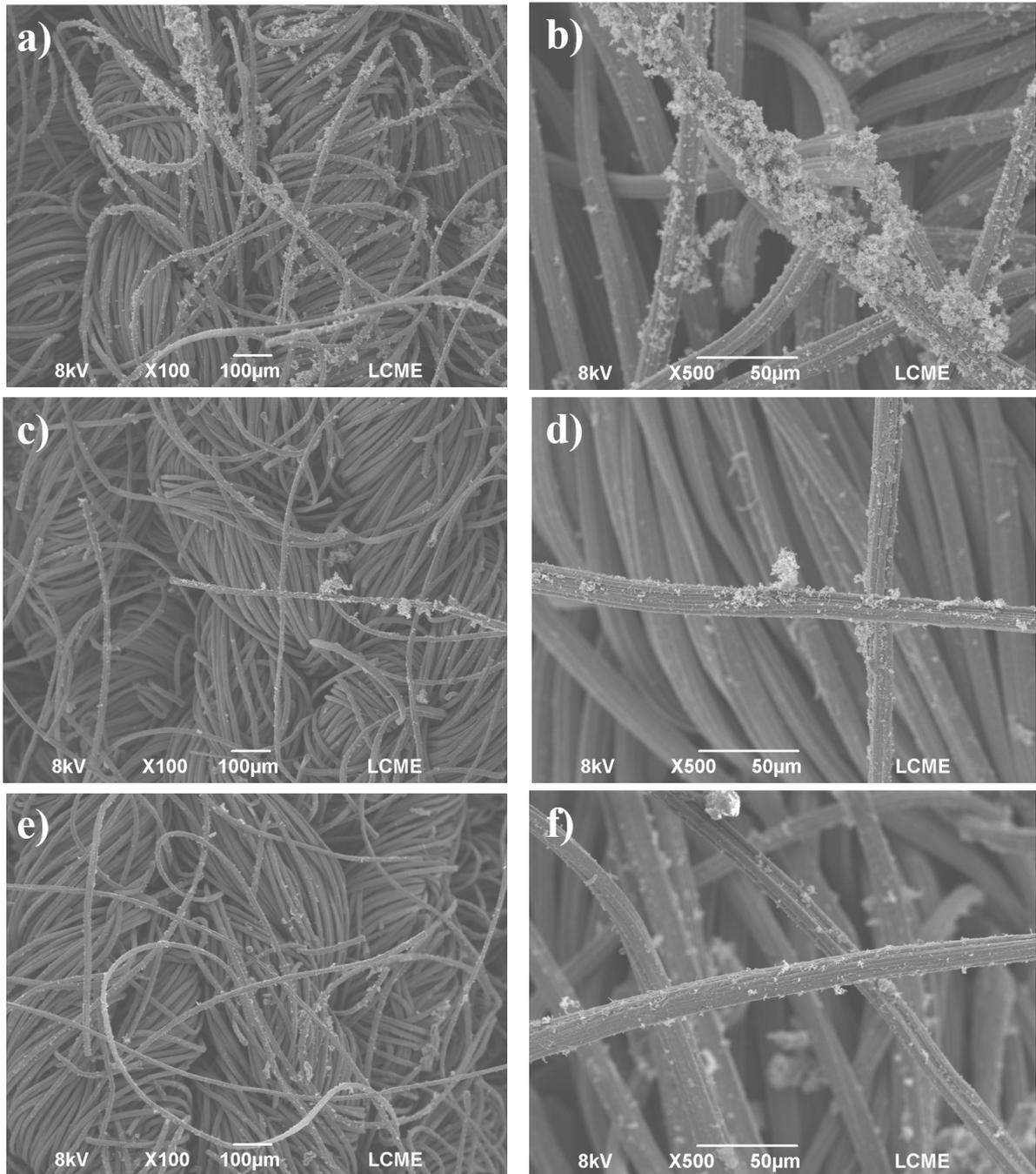
Para as malhas de jersey CO/PPy<sub>[0,08]</sub> e rib CV/PPy<sub>[0,08]</sub> os principais resultados obtidos foram relacionados à sua interação substrato e polímero condutor, resultados obtidos também a partir das análises físico-químicas de FTIR, DSC e mecânico com o ensaio de tração. Durante o procedimento de lavagem, as fibras de CO e CV podem encolher, conferindo à malha uma aparência mais compacta, fator que foi observado nas malhas após o revestimento com polímero condutor. As alterações na condutividade podem ser provocadas por remoção de partículas soltas na superfície, e por possível modificação da estrutura do PPy devido exposição à água e temperatura durante os ciclos de lavagem. Adicionalmente, é possível observar mudanças na estrutura da malha, como encolhimento, deformação ou relaxamento das fibras, uma vez que a presença do polipirrol pode influenciar a maneira como a malha reage à lavagem, potencialmente atenuando ou exacerbando tais efeitos.

Figura 32 – MEV da malha jersey CO/PPy<sub>[0,08]</sub> após ciclos de lavagem: a) e b) 1X; c) e d) 5X; e) e f) 10X



Fonte: Próprio autor

Figura 33 – MEV da malha rib CV/PPy<sub>[0,08]</sub> após ciclos de lavagem: a) e b) 1X; c) e d) 5X; e) e f) 10X



Fonte: Próprio autor

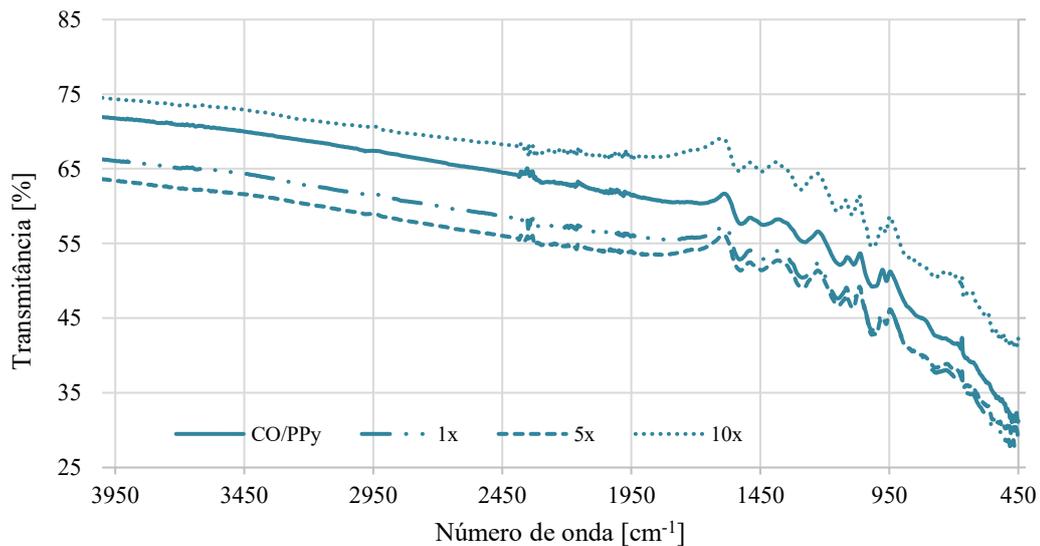
Para uma compreensão completa das alterações na estrutura e na composição da malha, foi realizada também a análise de espectroscopia de infravermelho (FTIR). Essa técnica de caracterização pode revelar danos superficiais e alterações na morfologia da malha, incluindo mudanças e desaparecimento de grupos funcionais característicos presentes em suas estruturas. Também pode identificar possíveis modificações químicas, como a hidrólise resultante da quebra de ligações químicas tanto no polímero condutor quanto na malha, e a

oxidação causada pela exposição ao oxigênio e outros agentes oxidantes durante o processo de lavagem.

#### 4.3.2 Espectroscopia infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) após ciclos de lavagem

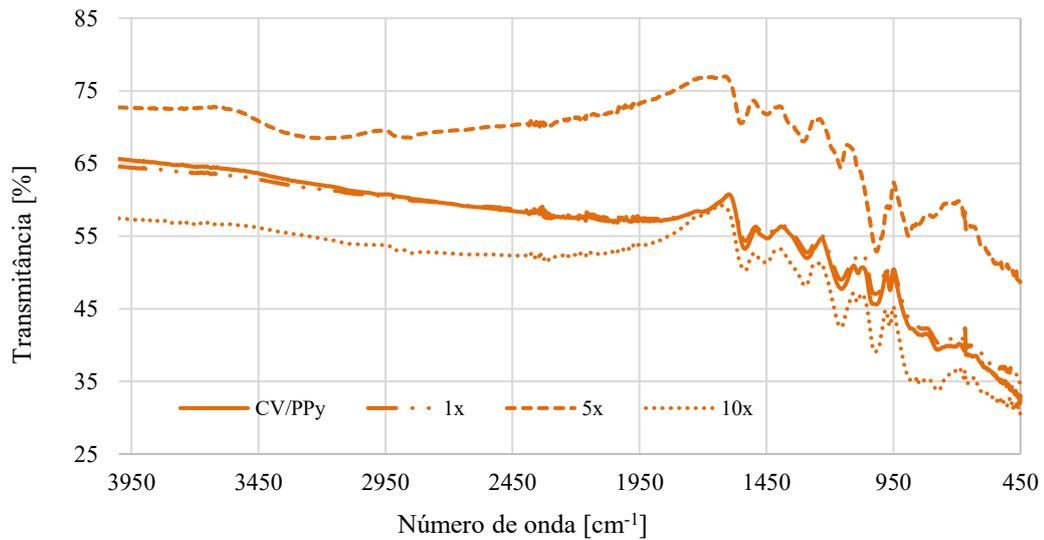
Alguns aspectos podem influenciar na estrutura química das malhas revestidas após a lavagem, como temperatura, utilização de detergente e agitação mecânica, como quebra de ligações por hidrólise e degradação das cadeias do polímero condutor. Na Figura 34 e Figura 35 são apresentados os espectros antes e depois os diferentes ciclos de lavagem das malhas de CO e CV. Conforme observado, as curvas de FTIR de CO e CV não apresentaram diferenças significativas se comparadas à malha funcionalizada antes da lavagem. Diante dessa análise, avalia-se que o processo de lavagem não retira a camada de PPy e assim, mantém-se as mesmas bandas relativos aos grupos funcionais observados antes da lavagem.

Figura 34 – FTIR da malha de CO revestida com PPy antes e após ciclos de lavagem



Fonte: Próprio autor

Figura 35 – FTIR da malha de CV revestida com PPy antes e após ciclos de lavagem



Os espectros de infravermelho revelaram mudanças pouco acentuadas nos padrões de absorção, como por exemplo, o aumento do percentual de transmitância nas amostras de rib CV/PPy<sub>[0,08]</sub>. Porém, as bandas, tanto CO/PPy<sub>[0,08]</sub> quanto CV/PPy<sub>[0,08]</sub>, se mantiveram inalteradas indicando que não houve modificações aparentes nas ligações e grupamentos químicos já observados na análise de FTIR antes dos ciclos de lavagem e na composição molecular das fibras.

#### 4.3.3 Ensaio de tração das amostras após ciclos de lavagem

Após os ciclos de lavagem foram analisados o comportamento mecânico da malha de CO, conforme apresentado na Tabela 11, indicando que os ciclos de lavagem não influenciaram o módulo de elasticidade e a resistência à ruptura das amostras.

Tabela 11 – Resultados ensaio de tração da malha de CO antes e após ciclos de lavagem

Amostras	Tensão de ruptura [MPa]	Módulo de elasticidade [MPa]	Alongamento [%]
CO/PPy	0,12 ± 0,01	0,55 ± 0,01	25,70 ± 0,10
CO/PPy – 1x	0,11 ± 0,03	0,28 ± 0,01	57,78 ± 0,03
CO/PPy – 5x	0,16 ± 0,05	0,29 ± 0,02	46,26 ± 0,02
CO/PPy – 10x	0,15 ± 0,03	0,41 ± 0,06	38,00 ± 0,06

O desempenho mecânico analisado no ensaio de tração, como resistência à ruptura, módulo de elasticidade e alongamento, foi avaliado nas malhas, demonstrando que a presença do revestimento foi além de uma simples deposição superficial, evidenciando uma interação e

adesão efetiva entre o substrato e o polímero condutor. Tal interação pode ser confirmada a partir das caracterizações químicas (FTIR) e térmicas (DSC), apresentadas anteriormente.

Outro fator que influencia a mudança das propriedades mecânicas da malha condutora após os ciclos de lavagem está ligado ao PPy em presença de água, podendo apresentar reações como absorção de água devido aos grupos funcionais polares presentes no PPy, como aminas e iminas que possuem afinidade com a água. Além disso, o PPy, em presença de água, pode sofrer hidrólise; a exposição prolongada do PPy a ambientes aquosos pode causar degradação, resultando na quebra das cadeias poliméricas e diminuição da condutividade. Zerbino et al. (2011) citaram em seu estudo que a presença de diferentes íons no eletrólito modifica a taxa de crescimento da espessura da camada, a resposta voltamétrica e a capacidade interfacial. Esses efeitos estão relacionados a variações na absorção de pirróis, concentração de radicais, estrutura dos oligômeros formados inicialmente durante a anodização e troca parcial de água ocorrendo junto com os processos de captação de íons alterando suas propriedades.

Hebeish et al. (2016), também avaliaram o desempenho das malhas de algodão polimerizada antes e após ciclos de lavagem. Os ensaios de adesão mecânica do PPy ao algodão por lavagem em água e pelo teste da fita, feitos pelos autores em sua pesquisa, não apresentam PPy visível na solução, o que significou que os tecidos condutores apresentam resistência à lavagem e forte ligação entre a malha e o PPy.

A resistência à tração da malha de CV funcionalizada com PPy também foi analisada após os ciclos de lavagem e os resultados estão apresentados na Tabela 12. Conforme observado, a resistência à ruptura apresentou uma queda na primeira lavagem e um crescimento nos ciclos de 5x e 10x, comportamento semelhante ao analisado nas malhas funcionalizadas de CO. Cada ciclo de lavagem tende a remover pequenas quantidades e partículas não aderidas na superfície, fazendo com que o valor da tensão de ruptura da malha revestida se aproxime cada vez mais da malha antes do revestimento. Além disso, as malhas condutoras de CV apresentaram uma queda do módulo de elasticidade de aproximadamente 60 %.

Esses resultados demonstram que de acordo com o aumento dos ciclos de lavagem a malha foi se tornando mais flexível devido à retirada de pequenas quantidades de partículas não aderidas da superfície, conforme verificado também na análise de MEV. Além disso, pode-se associar o aumento da flexibilidade à própria configuração da estrutura de rib que possui elementos longitudinais (ranhuras) que permitem maior movimento e deformação do tecido. Quanto ao alongamento, foi observado um aumento nos ciclos de 1x e 5x e um decaimento em 10x de cerca de 10 % para as amostras de jersey de CO/PPy<sub>[0,08]</sub> e rib de CV/PPy<sub>[0,08]</sub>. Esse

comportamento pode ser justificado pelo aumento da ductilidade nos ciclos de 1x e 5x e ao passo que ocorre os ciclos de lavagem e a malha vai se aproximando do estado inicial. Outro fato pode estar relacionado à própria interação do PPy em presença aquosa que pode sofrer hidrólise ou degradação oxidativa fragilizando a estrutura da malha.

Tabela 12 – Resultados ensaio de tração da malha de CV antes e após ciclos de lavagem

<b>Amostras</b>	<b>Tensão de ruptura [Mpa]</b>	<b>Módulo de elasticidade [MPa]</b>	<b>Alongamento [%]</b>
CV/PPy	0,15 ± 0,02	0,30 ± 0,01	87,40 ± 0,10
CV/PPy – 1x	0,07 ± 0,02	0,13 ± 0,01	96,19 ± 0,02
CV/PPy – 5x	0,16 ± 0,05	0,12 ± 0,01	94,10 ± 0,10
CV/PPy – 10x	0,14 ± 0,03	0,10 ± 0,01	79,52 ± 0,07

A fibra de viscose possui características específicas como capacidade de absorção de umidade, porém a resistência mecânica pode ser afetada após ciclos de lavagem, o que pode justificar o comportamento do substrato e do polímero condutor. A viscose contém grupos hidroxila (O-H) provenientes da celulose regenerada em sua estrutura, conforme verificado em seu FTIR, o que permite interação química a partir da afinidade com os grupos funcionais aminas presentes no anel pirrólico. Além disso, há a boa adesão do PPy na malha que resulta no aumento da tensão de ruptura após múltiplos ciclos de lavagem, conforme observado nos resultados do ensaio de tração. Bashir et al. (2014) descrevem que o polímero condutor, quando insolúvel em água, como o PEDOT e o PPy, assumem um comportamento de revestimento protetor contra os efeitos da lavagem.

Os resultados obtidos no ensaio de tração destacam a importância de compreender os efeitos dos ciclos de lavagem no desempenho de malhas condutoras. Observou-se que, após múltiplos ciclos de lavagem, houve uma mudança discreta na resistência à ruptura e uma queda acentuada no módulo de elasticidade de ambas as malhas. Essas observações ressaltam a necessidade de considerar não apenas o desempenho inicial, mas também a durabilidade e a estabilidade dos materiais condutores ao longo do tempo e após exposição a condições ambientais adversas, como os ciclos de lavagem. Essa compreensão é crucial para o desenvolvimento e aprimoramento contínuo de tecidos inteligentes e sensores têxteis para uma variedade de aplicações, desde tecnologias vestíveis até monitoramento de saúde e bem-estar.

#### 4.3.4 Ensaio de condutividade após ciclos de lavagem

Visando a avaliação da vida útil frente a diferentes ciclos de lavagem, as malhas funcionalizadas foram analisadas a partir da condutividade pelo método de 4 pontas, conforme apresentado nas Tabela 13 e Tabela 14, para malha de jersey CO/PPy<sub>[0,08]</sub> e rib CV/PPy<sub>[0,08]</sub>, respectivamente. Como observado na Tabela 13, a condutividade permaneceu na mesma ordem de grandeza ( $10^{-3}$ ) com uma queda pouco considerável antes e após os ciclos de lavagem de 1x, 5x e 10x. Além disso houve uma estabilização de condutividade no ciclo de 10 lavagens. Esse comportamento pode ser relacionado à remoção de PPy não aderido à superfície e entre as fibras conforme pode ser verificado principalmente na análise morfológica do MEV.

Tabela 13 – Análise de condutividade da malha jersey CO/PPy<sub>[0,08]</sub> antes e após diferentes ciclos de lavagem

Amostras	Condutividade [S/cm]
CO/PPy <sub>[0,08]</sub>	$5,57 \times 10^{-3}$
CO/PPy <sub>[0,08]</sub> – 1x	$4,31 \times 10^{-3}$
CO/PPy <sub>[0,08]</sub> – 5x	$2,31 \times 10^{-3}$
CO/PPy <sub>[0,08]</sub> – 10x	$2,45 \times 10^{-3}$

A análise de condutividade em amostras de malha de CV funcionalizada antes e após múltiplos ciclos de lavagem é apresentado na Tabela 14. A condutividade das malhas após a lavagem apresentou uma redução de duas ordens de grandeza na condutividade elétrica em relação ao CO/PPy<sub>[0,08]</sub> antes da lavagem. Esse comportamento pode ser justificado pela retirada do polímero condutor durante a lavagem que não foi aderido as fibras e ficaram soltas na superfície. Na Tabela 14 pode-se observar que a condutividade após diferentes ciclos de lavagem (ciclos de 1x, 5x e 10x) permaneceu na mesma ordem de grandeza ( $10^{-5}$ ), mostrando que a condutividade se estabilizou.

Tabela 14 – Análise de condutividade da malha rib CV/PPy<sub>[0,08]</sub> antes e após ciclos de lavagem

Amostras	Condutividade [S/cm]
CV/PPy <sub>[0,08]</sub>	$2,91 \times 10^{-3}$
CV/PPy <sub>[0,08]</sub> – 1x	$3,82 \times 10^{-5}$
CV/PPy <sub>[0,08]</sub> – 5x	$2,71 \times 10^{-5}$
CV/PPy <sub>[0,08]</sub> – 10x	$3,74 \times 10^{-5}$

Verifica-se, portanto que, embora ambas as amostras tenham experimentado uma redução na condutividade após a lavagem, ainda assim mantiveram níveis significativos de condutividade elétrica. Esse resultado indica que a funcionalização com o polímero condutor apresenta certa resistência à lavagem, garantindo que a condutividade elétrica fosse preservada mesmo após a exposição a agente de limpeza. Além disso, confirma o estudo de Bashir et al. (2011) que afirmaram que o polímero condutor forma uma camada protetora nas fibras, garantindo a propriedade de condutividade mesmo após a lavagem. É importante ressaltar que a redução da condutividade após a lavagem pode ser atribuída a vários fatores, incluindo a remoção parcial do polímero condutor da superfície das fibras, bem como alterações na estrutura da rede condutora devido à agitação mecânica e ao uso de detergentes durante o processo de lavagem.

Este resultado sugere uma resistência das malhas condutoras, indicando sua viabilidade para aplicações que exigem estabilidade elétrica após exposição repetida a processos de lavagem. Este estudo não apenas valida a durabilidade do material, mas também destaca seu potencial para uma ampla gama de aplicações, no qual garantir a usabilidade e as propriedades intrínsecas ao substrato funcionalizado após ciclos de lavagem é um fator importante.

Para uma avaliação abrangente das propriedades funcionais da malha, é essencial realizar análise adicional de condutividade elétrica, como ensaio eletromecânico, e de degradação como análise termogravimétrica (TGA). Especialmente quando se considera a aplicação potencial dessa malha em aplicações eletrônicas, como tecidos condutores para sensores ou dispositivos vestíveis. Ao incorporar materiais condutores em tecidos e acessórios que mantêm contato direto com o corpo, os *wearables* se tornam capazes de oferecer uma variedade impressionante de funcionalidades, desde o monitoramento de saúde até interação com dispositivos inteligentes. Essa integração íntima com o corpo permite uma comunicação contínua entre o usuário e a tecnologia, abrindo portas para inovações notáveis em campos

como fitness, saúde, entretenimento e até mesmo segurança pessoal (Prieto-Avalos et al., 2022; Younes, 2023).

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma investigação das condições de processamento para a obtenção da melhor condição de malhas comerciais de algodão e viscose funcionalizadas superficialmente com polipirrol.

Com base nos objetivos específicos, foi possível estudar e definir a melhor condição de polimerização *in situ*. Concluiu-se que as malhas de estrutura jersey de CO e estrutura rib de CV apresentaram as melhores propriedades de condutividade, concluindo que o aumento da condutividade está relacionado ao tempo de polimerização e ao ganho de massa nas malhas. Após as análises verificou-se que a estrutura influencia no fator de cobertura e gramatura das malhas.

A caracterização físico-química por FTIR evidenciou que as malhas após polimerizadas apresentaram interações químicas com o polímero condutor. Na análise morfológica foi possível analisar a deposição e dispersão das partículas sobre a superfície da malha, demonstrando a interação física entre substrato e polímero condutor.

Na análise térmica, por meio de DSC, observou-se que houve interação física e química entre as malhas de CO e CV com o PPy, provando que o polímero não apenas se depositou na superfície como promoveu mudança no comportamento térmico das malhas.

O ensaio de tração mostrou poucas mudanças na resistência à ruptura e o aumento da rigidez da malha condutora, atribuindo-se principalmente ao processo de polimerização no qual são realizadas ligações químicas que fragilizam a estrutura da malha condutora reduzindo sua resistência mecânica.

Nos ensaios relacionados aos diferentes ciclos de lavagem, avaliou-se a manutenção da condutividade mesmo após lavar a malha condutora 1x, 5x e 10x, comprovando que o polímero condutor permanece na depositado e interagindo com a malha. Tal resultado propicia uma gama interessante de possíveis aplicações, incluindo sensores biomédicos, dispositivos vestíveis e têxteis inteligentes.

Pode-se afirmar que os resultados obtidos contribuem com o avanço da pesquisa em têxteis inteligentes e abrem caminho para futuros estudos que visem melhorar ainda mais as propriedades condutoras e a estabilidade de malhas após ciclos de lavagem simulando a sua utilização.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se:

- A realização de ensaios eletromecânicos para avaliar a interação mecânica e condutividade da malha condutora.
- Ensaio de degradação térmica por meio de análise termogravimétrica para entender comportamento de degradação da malha condutora.
- Análise de abrasão por meio do ensaio de Martindale a fim de verificar se os múltiplos ciclos de abrasão influenciam na condutividade.
- Avaliação se o ponto flutuante e carregado influencia na condutividade das malhas.
- Montagem de dispositivo completo com fonte de geração de energia e fonte de armazenamento para estudar as possíveis aplicações.
- Verificar o efeito da condutividade reduzindo a razão entre pirrol e o agente oxidante.

## 7 REFERÊNCIAS

AGUIAR, Catia Rosa Lange. Engenharia Têxtil: uma abordagem simplificada. Florianópolis: Editora da UFSC, 2022. p. 23-77; 311 p.

ABIDI, N.; CABRALES, L.; HAIGLER, C. H. Changes in the cell wall and cellulose content of developing cotton fibers investigated by FTIR spectroscopy. **Carbohydrate Polymers**, v. 100, p. 9–16, 2014.

ABIDI, N.; MANIKE, M. X-ray diffraction and FTIR investigations of cellulose deposition during cotton fiber development. **Textile Research Journal**, v. 88, n. 7, p. 719–730, 1 abr. 2018.

ALHARBI, N. D. et al. Development and characterization of cotton fabrics by dipping in solutions of chitosan and ZnO-nanoparticles as promising environmentally friendly reinforcements for polymer composites. **Polymers and Polymer Composites**, v. 30, 1 jan. 2022.

AL-OQLA, F. M. et al. **Natural fiber reinforced conductive polymer composites as functional materials: A review**. **Synthetic Metals** Elsevier Ltd, , 22 maio 2015.

BAHNERS, T. et al. Improvement of fibre–matrix adhesion in cellulose/polyolefin composite materials by means of photo-chemical fibre surface modification. **Cellulose**, v. 25, n. 4, p. 2451–2471, 1 abr. 2018.

BAIK, K. et al. Integration of polypyrrole electrode into piezoelectric PVDF energy harvester with improved adhesion and over-oxidation resistance. **Polymers**, v. 11, n. 6, 2019.

BASHIR, T. et al. Stretch sensing properties of conductive knitted structures of PEDOT-coated viscose and polyester yarns. **Textile Research Journal**, v. 84, n. 3, p. 323–334, 2014.

BASHIR, T.; SKRIFVARS, M.; PERSSON, N. K. Production of highly conductive textile viscose yarns by chemical vapor deposition technique: A route to continuous process. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 22, n. 12, p. 2214–2221, dez. 2011a.

BASHIR, T.; SKRIFVARS, M.; PERSSON, N. K. Production of highly conductive textile viscose yarns by chemical vapor deposition technique: A route to continuous process. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 22, n. 12, p. 2214–2221, dez. 2011b.

BOBER, P. et al. The deposition of globular polypyrrole and polypyrrole nanotubes on cotton textile. **Applied Surface Science**, v. 356, p. 737–741, 2015.

BUENO, M. A.; CAMILLIERI, B. Structure and mechanics of knitted fabrics. Em: **Structure and Mechanics of Textile Fibre Assemblies**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 61–107.

CAMPOS, J. et al. **Chitosan pretreatment for cotton dyeing with black tea**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais...**Institute of Physics Publishing, 8 nov. 2017.

CARRILLO, F. et al. Structural FTIR analysis and thermal characterisation of lyocell and viscose-type fibres. **European Polymer Journal**, v. 40, n. 9, p. 2229–2234, set. 2004.

CESA, F. S.; TURRA, A.; BARUQUE-RAMOS, J. Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: A review from textile perspective with a focus on domestic washings. **Science of the Total Environment**, v. 598, p. 1116–1129, 2017.

CHEN, G. et al. Smart Textiles for Electricity Generation. **Chemical Reviews**, v. 120, n. 8, p. 3668–3720, 2020a.

CHEN, G. et al. Smart Textiles for Electricity Generation. **Chemical Reviews**, v. 120, n. 8, p. 3668–3720, 2020b.

CHEN, Y. et al. High-performance smart cellulose nanohybrid aerogel fibers as a platform toward multifunctional textiles. **Chemical Engineering Journal**, v. 466, n. February, p. 143153, 2023.

CHERENACK, K.; VAN PIETERSON, L. Smart textiles: Challenges and opportunities. **Journal of Applied Physics**, v. 112, n. 9, 2012.

DALL'ACQUA, L. et al. Performances and properties of intrinsic conductive cellulose-polypyrrole textiles. **Synthetic Metals**, v. 146, n. 2, p. 213–221, 20 out. 2004.

DEOGAONKAR, S. C.; AMOL, &; PATIL, J. **Development of conductive cotton fabric by in situ chemical polymerization of pyrrole using ammonium peroxodisulphate as oxidant****Indian Journal of Fibre & Textile Research**. [s.l.: s.n.].

DRIS, R. et al. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? **Marine Pollution Bulletin**, v. 104, n. 1–2, p. 290–293, 2016.

FAEZ, R. et al. Polímeros condutores. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, v. 11, p. 13–19, 2003.

FERREIRA, A. J. S.; FERREIRA, F. B. N.; OLIVEIRA, F. R. Têxteis Inteligentes – Uma breve revisão da literatura Smart Textile – A Review of Literature (State of the Art). **Revista de design, inovação e gestão estratégica**, v. 5, n. 1, p. 22, 2014a.

FERREIRA, A. J. S.; FERREIRA, F. B. N.; OLIVEIRA, F. R. Têxteis Inteligentes – Uma breve revisão da literatura Smart Textile – A Review of Literature (State of the Art). **Revista de design, inovação e gestão estratégica**, v. 5, n. 1, p. 22, 2014b.

FERREIRA, D. P.; FERREIRA, A.; FANGUEIRO, R. Searching for natural conductive fibrous structures via a green sustainable approach based on jute fibers and silver nanoparticles. **Polymers**, v. 10, n. 1, 11 jan. 2018.

FIROZ BABU, K.; SIVA SUBRAMANIAN, S. P.; ANBU KULANDAINATHAN, M. Functionalisation of fabrics with conducting polymer for tuning capacitance and fabrication of supercapacitor. **Carbohydrate Polymers**, v. 94, n. 1, p. 487–495, 2013.

GAO, D. et al. Super wear-resistant and conductive cotton fabrics based on silver nanowires. **Journal of Industrial Textiles**, v. 51, n. 5\_suppl, p. 8227S-8245S, 1 jun. 2022.

GAUCHE, H. et al. Screen Printing of Cotton Fabric with Hydrochromic Paste: Evaluation of Color Uniformity, Reversibility and Fastness Properties. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 7, p. 2694–2705, 2022a.

GAUCHE, H. et al. Screen Printing of Cotton Fabric with Hydrochromic Paste: Evaluation of Color Uniformity, Reversibility and Fastness Properties. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 7, p. 2694–2705, 2022b.

GRANCARIĆ, A. M. et al. **Conductive polymers for smart textile applications**. [s.l: s.n.]. v. 48

GRANCARIĆ, A. M. et al. **Conductive polymers for smart textile applications**. [s.l: s.n.]. v. 48

GUNASEKARA, D. S. W. et al. Pyrrole Coating with In Situ Polymerization for Piezoresistive Sensor Development - A Review. **Macromolecular Research**, v. 30, n. 3, p. 153–162, 2022.

GUO, S. et al. Comparison of life cycle assessment between lyocell fiber and viscose fiber in China. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 8, p. 1545–1555, 2021.

HAN, Y.; DAI, L. Conducting Polymers for Flexible Supercapacitors. **Macromolecular Chemistry and Physics**, v. 220, n. 3, p. 1–14, 2019.

HAO, L. et al. **Polypyrrole Nanomaterials: Structure, Preparation and Application**. **PolymersMDPI**, , 1 dez. 2022.

HASANI, H. et al. Biaxial weft-knitted fabrics as composite reinforcements: A review. **Journal of Industrial Textiles**, v. 46, n. 7, p. 1439–1473, 2017a.

HASANI, H. et al. Biaxial weft-knitted fabrics as composite reinforcements: A review. **Journal of Industrial Textiles**, v. 46, n. 7, p. 1439–1473, 2017b.

HEBEISH, A. et al. Advancement in conductive cotton fabrics through in situ polymerization of polypyrrole-nanocellulose composites. **Carbohydrate Polymers**, v. 151, p. 96–102, 20 out. 2016.

JIA, J. et al. An “OFF-to-ON” shape memory polymer conductor for early fire disaster alarming. **Chemical Engineering Journal**, v. 431, n. P4, p. 133285, 2022.

KALIMULDINA, G. et al. A Review of Piezoelectric PVDF Film by Electrospinning and Its Applications. **Sensors**, v. 20, n. 5214, 2020.

KONCAR, V. **Introduction to smart textiles and their applications**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2016.

LEE, S.; PARK, C. H. Conductivity, superhydrophobicity and mechanical properties of cotton fabric treated with polypyrrole by in-situ polymerization using the binary oxidants ammonium Peroxodisulfate and ferric chloride. **Textile Research Journal**, v. 89, n. 12, p. 2376–2394, 1 jun. 2019.

LI, Y. et al. Kinetics and characterization of preparing conductive nanofibrous membrane by In-situ polymerization of Polypyrrole on electrospun nanofibers. **Chemical Engineering Journal**, v. 433, n. P2, p. 133531, 2022.

LIAO, Y. et al. An eco-friendly N[<sub>s</sub>nd]P flame retardant for durable flame-retardant treatment of cotton fabric. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 187, p. 251–261, 30 set. 2021.

LIU, Y. **Recent progress in Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy study of compositional, structural and physical attributes of developmental cotton fibers**. **Materials**, 2013.

LUGOLOOBI, I.; MEMON, H. **Chemical Structure and Modification of Cotton**. [s.l: s.n.].

LUND, A. et al. A polymer-based textile thermoelectric generator for wearable energy harvesting. **Journal of Power Sources**, v. 480, n. May, p. 228836, 2020.

MAESTRI, G. **Efeito piezoelétrico em têxteis inteligentes utilizando malhas por trama**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

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

MATYJASZEWSKI, K.; MÖLLER, M. **POLYMERS FOR A SUSTAINABLE ENVIRONMENT AND GREEN ENERGY**. [s.l: s.n.].

MEDEIROS, E. S. et al. Uso de Polímeros Condutores em Sensores . **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 7, n. 2, p. 62–77, 2012a.

MEDEIROS, E. S. et al. Uso de Polímeros Condutores em Sensores . **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 7, n. 2, p. 62–77, 2012b.

MERLINI, C. **Desenvolvimento de membranas eletrofiadas de poli (fluoreto de vinilideno) com polipirrol com aplicação em sensores de compressão**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

MERLINI, C. et al. Polyaniline-coated coconut fibers: Structure, properties and their use as conductive additives in matrix of polyurethane derived from castor oil. **Polymer Testing**, v. 38, p. 18–25, 2014.

MERLINI, C.; RAMÔA, S. D. A. S.; BARRA, G. M. O. Conducting Polypyrrole-Coated Banana Fiber Composites: Preparation and Characterization. **Polymer Composites**, v. 34, n. 4, p. 537–543, 2013.

MOHAMED, A. L.; EL-NAGGAR, M. E.; HASSABO, A. G. Preparation of hybrid nanoparticles to enhance the electrical conductivity and performance properties of cotton fabrics. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 542–554, 2021.

NIE, H. et al. In-situ electrochemical polymerization of polypyrrole on LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.1</sub>Mn<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> cathode with improved performance for lithium-ion batteries. **Materials Letters**, v. 335, n. December 2022, 2023.

OVHAL, M. M. et al. Flexible, stripe-patterned organic solar cells and modules based on multilayer-printed Ag fibers for smart textile applications. **Materials Today Energy**, v. 34, p. 101289, 2023.

PEETS, P. et al. Reflectance FT-IR spectroscopy as a viable option for textile fiber identification. **Heritage Science**, v. 7, n. 1, 1 dez. 2019.

PRIETO-AVALOS, G. et al. **Wearable Devices for Physical Monitoring of Heart: A Review**. **BiosensorsMDPI**, , 1 maio 2022.

RAHMAN, S. S.; SIDDIQUA, S.; CHERIAN, C. Sustainable applications of textile waste fiber in the construction and geotechnical industries: A retrospect. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 6, n. October 2020, p. 100420, 2022.

REBELEIN, A. et al. Microplastic fibers — Underestimated threat to aquatic organisms? **Science of the Total Environment**, v. 777, p. 146045, 2021.

REHAN, M. et al. Development of Ag/AgX (X=Cl, I) nanoparticles toward antimicrobial, UV-protected and self-cleanable viscose fibers. **Carbohydrate Polymers**, v. 197, n. May, p. 227–236, 2018.

RUCKDASHEL, R. R.; KHADSE, N.; PARK, J. H. Smart E-Textiles: Overview of Components and Outlook. **Sensors**, v. 22, n. 16, 2022.

SALMAN, MD. S. et al. Chitosan-coated cotton fiber composite for efficient toxic dye encapsulation from aqueous media. **Applied Surface Science**, v. 622, n. March, p. 157008, 2023.

SCHWARZ, A. et al. A roadmap on smart textiles. **Textile Progress**, v. 42, n. 2, p. 99–180, 2010.

SELVAM, S.; YIM, J. H. Effective self-charge boosting sweat electrolyte textile supercapacitors array from bio-compatible polymer metal chelates. **Journal of Power Sources**, v. 556, n. November 2022, p. 232511, 2023.

SHI, Q. et al. Advanced Functional Fiber and Smart Textile. **Advanced Fiber Materials**, v. 1, n. 1, p. 3–31, 2019.

SINGHA, K.; KUMAR, J.; PANDIT, P. Recent advancements in wearable & smart textiles: An overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 16, p. 1518–1523, 2019.

SRINIVASAN, H. et al. Desert cotton and areca nut husk fibre reinforced hybridized bio-benzoxazine/epoxy bio-composites: Thermal, electrical and acoustic insulation applications. **Construction and Building Materials**, v. 363, n. September 2022, p. 129870, 2023.

STOPPA, M.; CHIOLERIO, A. Wearable electronics and smart textiles: A critical review. **Sensors (Switzerland)**, v. 14, n. 7, p. 11957–11992, 2014.

STUART, T. et al. Modelling of wicking and moisture interactions of flax and viscose fibres. **Carbohydrate Polymers**, v. 123, p. 359–368, 5 jun. 2015.

SYDUZZAMAN, M. et al. Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview. **Journal of Textile Science & Engineering**, v. 05, n. 01, 2015.

WANG, L. et al. Highly electrically conductive polymer composite with a novel fiber-based segregated structure. **Journal of Materials Science**, v. 55, n. 25, p. 11727–11738, 1 set. 2020.

WANG, N. et al. Conductive polypyrrole/viscose fiber composites. **Carbohydrate Polymers**, v. 127, p. 332–339, 20 ago. 2015.

WENG, L.; ZHANG, X. Fully bio-based fire-safety composite from cotton/viscose wastes and alginate fiber as furniture materials. **Waste Management**, v. 168, n. March, p. 137–145, 2023.

WIMMER, P.; ZACHARIAS, J. Viscose speciality fibres – bio-based fibres for filtration. **Filtration and Separation**, v. 52, n. 3, p. 36–39, 2015.

WU, Y.; MECHAEL, S. S.; CARMICHAEL, T. B. Wearable E-Textiles Using a Textile-Centric Design Approach. **Accounts of Chemical Research**, v. 54, n. 21, p. 4051–4064, 2021.

XIA, Y.; LU, Y. Conductive polymers/polyacrylonitrile composite fibers: Fabrication and properties. **Polymer Composites**, v. 31, n. 2, p. 340–346, fev. 2010.

XIA, Z. et al. Comparative study of cotton, ramie and wool fiber bundles' thermal and dynamic mechanical thermal properties. **Textile Research Journal**, v. 86, n. 8, p. 856–867, 1 maio 2016.

XIE, J. et al. In situ polymerization of polypyrrole on cotton fabrics as flexible electrothermal materials. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 14, 2019.

XU, Y.; LU, Z.; TANG, R. Structure and thermal properties of bamboo viscose, tencel and conventional viscose fiber. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 89, n. 1, p. 197–2021, 2007.

YAZICI, P. et al. Synthesize and characterization of sustainable natural fibers/conductive polymer composites. **Journal of Industrial Textiles**, v. 51, n. 5\_suppl, p. 8338S-8361S, 1 jun. 2022.

YILMAZ, N. D. **Smart Textiles**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2018.

YOUNES, B. **Smart E-textiles: A review of their aspects and applications**. **Journal of Industrial Textiles** SAGE Publications Ltd, , 1 jan. 2023.

YUSSUF, A. et al. Synthesis and Characterization of Conductive Polypyrrole: The Influence of the Oxidants and Monomer on the Electrical, Thermal, and Morphological Properties. **International Journal of Polymer Science**, v. 2018, 2018.

ZHANG, C. et al. Recent Progress of Wearable Piezoelectric Nanogenerators. **ACS Applied Electronic Materials**, v. 3, n. 6, p. 2449–2467, 2021.

ZHANG, M. et al. Weft-Knitted Fabric for a Highly Stretchable and Low-Voltage Wearable Heater. **Advanced Electronic Materials**, v. 3, n. 9, p. 1–8, 2017.

ZHANG, W.; ZENG, Q. M.; TANG, R. C. Gallic acid functionalized polylysine for endowing cotton fiber with antibacterial, antioxidant, and drug delivery properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 216, n. April, p. 65–74, 2022.

ZHANG, X. et al. High-performance multimodal smart textile for artificial sensation and health monitoring. **Nano Energy**, v. 103, n. PAZHANG, X. et al. High-performance multimodal smart textile for artificial sensation and health monitoring. **Nano Energy**, v. 103, n. PA, p. 107778, 2022., p. 107778, 2022.

ZHANG, X.; MA, P. Application of Knitting Structure Textiles in Medical Areas. **Autex Research Journal**, v. 18, n. 2, p. 181–191, 2018.