



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

Pedro Edgar Bachmann

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE MALHA POR TRAMA
FUNCIONALIZADA COM POLIPIRROL**

Blumenau

2023

Pedro Edgar Bachmann

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE MALHA POR TRAMA
FUNCIONALIZADA COM POLIPIRROL**

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

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Fernanda Steffens

Blumenau

2023

bachmann, Pedro Edgar

ESTUDO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE MALHA POR TRAMA
FUNCIONALIZADA COM POLIPIRROL / Pedro Edgar bachmann ;
orientador, Fernanda Steffens, 2023.

56 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em
Engenharia Têxtil, Blumenau, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Malha por trama. 3. Polipirrol. 4.
Têxtil Inteligente. I. Steffens, Fernanda. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Têxtil. III.
Título.

Pedro Edgar Bachmann

**Estudo de condutividade elétrica em malha por trama funcionalizada
com polipirrol**

Este Projeto Final de Curso II foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Têxtil, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Têxtil.

Blumenau, 01 de dezembro de 2023.



Documento assinado digitalmente

Grazyella Cristina Oliveira de Aguiar

Data: 05/12/2023 10:10:27-0300

CPF: ***.439.299-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Grazyella Cristina Oliveira de Aguiar, Dr^a.

Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Fernanda Steffens

Data: 05/12/2023 10:11:14-0300

CPF: **.009.749-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Fernanda Steffens, Dr^a.

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

BRENNO HENRIQUE SILVA FELIPE

Data: 05/12/2023 10:20:25-0300

CPF: ***.335.334-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Brenno Henrique Silva Felipe, Dr.
UFSC - DET



Documento assinado digitalmente

BRUNA PORTO

Data: 05/12/2023 10:07:46-0300

CPF: ***.027.949-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Bruna Porto, Dr^a.

UFSC - DET

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina, por proporcionar um ambiente propício para o desenvolvimento deste projeto.

À minha namorada, Gabriela Roedel, por todo amor, cumplicidade e apoio durante este processo.

À minha mãe Adriana Maria Reiter Bachmann e meu pai Julio Edgar Bachmann, por todo amor, carinho e apoio durante esta etapa de graduação. Sem vocês nada disso seria possível.

Aos meus familiares que me incentivaram e me acolheram.

À minha orientadora Prof^a Fernanda Steffens, pelo suporte, carinho e atenção durante esta caminhada.

Aos meus amigos Vini, Dalponte e Sarah que dividiram as angústias e felicidades diárias comigo.

À Ludimilla que durante o desenvolvimento deste trabalho me auxiliou continuamente.

Aos colegas e acadêmicos que me incentivaram e auxiliaram nesta caminhada.

Aos docentes do Departamento de Engenharia Têxtil, que direta ou indiretamente contribuíram com meu aprendizado.

A todos, muito obrigado.

“Lights will guide you home.”

(Chris Martin)

RESUMO

A categoria de têxteis técnicos está em constante expansão. O desenvolvimento da indústria têxtil para além do convencional se torna realidade à medida que novas tecnologias emergem. Os têxteis inteligentes têm este carácter inovador para agregar valor aos têxteis convencionais. São classificados em diferentes categorias como passivos, ativos e muito inteligentes, à medida que se tornam mais responsivos e adaptáveis às condições em que estão inseridos. Com o intuito de desenvolver um dispositivo inteligente a partir de um raporte de malha convencional, como a malha jersey de algodão, o presente trabalho procedeu com a funcionalização da malha a partir da polimerização *in situ* do pirrol (Py) líquido, em diferentes concentrações e tempos de polimerização. Após as análises de condutividade, foi selecionada a melhor condição para verificar a adesão do polímero frente à ciclos de lavagem. Pelas análises de condutividade, a concentração de $\frac{1}{4}$ do padrão e 60 minutos de polimerização apresentou o maior valor de condutividade elétrica, $5,57 \times 10^{-3}$ S/cm. Análises de tração foram realizadas na direção das colunas, demonstrando uma perda de resistência após a polimerização. Os ensaios de lavagens apresentaram diminuição de condutividade, ao passo que se manteve a ordem de grandeza de 10^{-3} S/cm. A este respeito, o desenvolvimento do têxtil condutor à base de malha por trama jersey de algodão se apresentou promissor na produção de um dispositivo têxtil inteligente, demonstrando potencial aplicação na área de e-têxteis e eletrônicos vestíveis.

Palavras-chave: polimerização; algodão; lavagem; têxteis inteligentes.

ABSTRACT

The category of technical textiles is constantly expanding. The development of the textile industry beyond the conventional is becoming a reality as new technologies emerge. Smart textiles have this innovative character to add value to conventional textiles. They are classified into different categories such as passive, active and very smart, as they become more responsive and adaptable to the conditions in which they are inserted. In order to develop an intelligent device from a conventional knitted fabric, such as cotton single jersey, this study proceeded with the functionalization of the knitted fabric through the in situ polymerization of liquid pyrrole (Py) at different concentrations and polymerization times. After conductivity analysis, the best condition was selected to check the adhesion of the polymer to washing cycles. From the conductivity analysis, the concentration of $\frac{1}{4}$ of the standard and 60 minutes of polymerization showed the highest electrical conductivity value, 5.57×10^{-3} S/cm. Tensile strength analyses were carried on wale direction, showing a loss of strength after polymerization. The washing tests showed a decrease in conductivity, while the order of magnitude of 10^{-3} S/cm was maintained. In this regard, the development of conductive textiles based on cotton jersey weft knitted fabric has shown promise in the production of a smart textile device, demonstrating potential application in the field of e-textiles and wearables.

Keywords: polymerization; cotton; washing; smart textiles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo dos têxteis inteligentes eletrônicos.	19
Figura 2 – Classificação dos materiais têxteis inteligentes.	21
Figura 3 – Fibras têxteis.	22
Figura 4 – Tipos de malharia.	24
Figura 5 – Estrutura Jersey: direito técnico (a) e o avesso técnico (b).	25
Figura 6 – Estrutura química dos monômeros dos principais PIC's.	26
Figura 7 – Esquema experimental de polimerização <i>in situ</i> do polipirrol.	33
Figura 8 – Eletrometro e fonte de elevada tensão.	34
Figura 9 – Média de ganho de massa após a polimerização.	39
Figura 10 – Condutividade elétrica média das amostras.	40
Figura 11 – Análise de MEV da amostra de CO não funcionalizada com ampliação de 50x (a) e 1000x (b).	41
Figura 12 – Análise de MEV da amostra de CO funcionalizada com ¼ do padrão e 60 minutos de polimerização com ampliação de 50x (a) e 1000x (b).	42
Figura 13 – Aspecto visual da malha antes (a) e após (b) a polimerização.	42
Figura 14 – FTIR da malha jersey de CO antes e após a polimerização do PPy.	43
Figura 15 – Resistência a tração da malha de CO se funcionalização na direção das colunas e fileiras.	44
Figura 16 – Resistência à tração da malha de CO funcionalizada com PPy na direção das colunas.	45
Figura 17 – Condutividade elétrica após ciclos de lavagem	46
Figura 18 – FTIR das amostras funcionalizadas antes e após os ciclos de lavagem.	47
Figura 19 – MEV da amostra polimerizada após 1 ciclo de lavagem com ampliação de 100x (a) e 500x (b).	48
Figura 20 – MEV da amostra polimerizada após 5 ciclos de lavagem com ampliação de 100x (a) e 500x (b).	49
Figura 21 – MEV da amostra polimerizada após 10 ciclos de lavagem com ampliação de 100x (b) e 1000x (c).	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de polimerização	32
Tabela 2 – Espessura da malha de algodão.	36
Tabela 3 – Comprimento de laçada da malha de algodão.	37
Tabela 4 – Densidade da malha de algodão.	37
Tabela 5 – Gramatura da malha de algodão.	38
Tabela 6 – Título do fio da malha de algodão.	38
Tabela 7 – Comprimentos de onda característicos do FTIR de CO e CO/PPy.	43
Tabela 8 – Comprimentos de onda característicos do FTIR após as lavagens.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAPA	Associação Brasileira de Produtores de Algodão
CO	Algodão
ClO_4^-	Perclorato
FeCl_3	Cloreto férrico
FTIR	Espectroscopia Infravermelho com Transformada de Fourier
H_2O	Água
LABENE	Laboratório de Beneficiamento
LABMAM	Laboratório de Meio Ambiente
LABTEC	Laboratório de Tecidos e Malhas
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
LEM	Laboratório de Ensaios Mecânicos
LTE	Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia
LTMA	Laboratório de Transformações e Materiais Avançados
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Na^+	Íon sódio
NPs	Nanopartículas
PA	Poli (acetileno)
PANI	Polianilina
PEDOT	Poli (3,4-etilenodioxitiofeno)
PICs	Polímeros intrinsecamente condutores
POLICOM	Laboratório de Polímeros e Compósitos
PPP	Poli (p-fenileno)
PPV	Poli (p-fenileno vinileno)
PPy	Polipirrol
PT	Politiofeno
PVDF	Poli (fluoreto de vinilideno)
Py	Pirrol
TiO_2	Dióxido de titânio
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
ρ	Resistividade elétrica
Ω	Ohm

w

Espessura

σ

Condutividade elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo geral.....	17
1.1.2	Objetivos específicos.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	TEXTEIS INTELIGENTES.....	18
2.2	FIBRAS TEXTEIS	21
2.2.1	Fibra de algodão	22
2.3	TECNOLOGIA DE MALHARIA.....	23
2.3.1.1	<i>Jersey.....</i>	<i>24</i>
2.4	POLÍMEROS INTRINSECAMENTE CONDUTORES	25
2.4.1	Polipirrol.....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	MATERIAIS	30
3.2	MÉTODOS	30
3.2.1	Caracterização da malha por trama jersey de algodão	30
3.2.1.1	<i>Espessura.....</i>	<i>30</i>
3.2.1.2	<i>Comprimento de laçada.....</i>	<i>30</i>
3.2.1.3	<i>Número de carreiras e cursos</i>	<i>31</i>
3.2.1.4	<i>Gramatura</i>	<i>31</i>
3.2.1.5	<i>Título do fio</i>	<i>31</i>
3.2.1.6	<i>Fator de cobertura.....</i>	<i>31</i>
3.2.2	Polimerização <i>in situ</i> do pirrol	32
3.2.2.1	<i>Condutividade elétrica pelo método de 4 pontas</i>	<i>33</i>
3.2.2.2	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....</i>	<i>34</i>
3.2.2.3	<i>Espectroscopia infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....</i>	<i>35</i>
3.2.2.4	<i>Ensaio de tração.....</i>	<i>35</i>
3.2.2.5	<i>Lavagem do substrato.....</i>	<i>35</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA MALHA POR TRAMA	36
4.2	POLIMERIZAÇÃO <i>IN SITU</i> DO PIRROL	38

4.2.1	Microscopia eletrônica de varredura.....	41
4.2.2	Espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	42
4.2.3	Ensaio de tração.....	44
4.2.4	Lavagem do substrato	46
<i>4.2.4.1</i>	<i>Espectroscopia infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i>	<i>47</i>
<i>4.2.4.2</i>	<i>Microscopia eletrônica de varredura após lavagem.....</i>	<i>48</i>
5	CONCLUSÃO.....	50
	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Os têxteis técnicos representam um segmento em constante expansão. Este setor da indústria apresenta uma perspectiva de crescimento anual de mais de 6 % para o período de 2020 a 2025 (*Markets & Markets, 2020*). Suas características conferem um alto valor agregado ao produto por apresentar o desempenho que têxteis convencionais não suportam (RASHEED, 2020).

É notório que o desenvolvimento da indústria têxtil para além do vestuário convencional se torna viável diante de tecnologias inovadoras, como intituladas que compreendem os têxteis inteligentes, que é considerada uma subclasse dos têxteis técnicos. Estes produtos apresentam características reativas às condições ambientais, sejam eles estímulos mecânicos, térmicos, elétricos ou de outra natureza (MAESTRI, 2023; GAUCHE, 2022).

No desenvolvimento de têxteis inteligentes, as malhas por trama se tornam protagonistas. Esta classe de superfície têxtil apresenta uma estrutura entrelaçada que confere não apenas boa flexibilidade, como elasticidade para o substrato produzido (ZHANG; MA, 2018). Malhas com raporte jersey destacam-se pela sua simplicidade de produção, sendo utilizadas em larga escala na manufatura de camisetas. Elas correspondem a 1/5 da produção mundial dos teares circulares voltados para a produção de camisetas (POWER, 2012).

O desenvolvimento de têxteis inteligentes pode apresentar dificuldades diante seu uso extensivo, o qual pode propiciar falhas estruturais decorrentes do desgaste. Gehrke et al (2019) citam que dispositivos têxteis devem resistir a produtos químicos, esforços abrasivos e mecânicos, principalmente oriundos da lavagem e em relação ao ciclo de vida destes processos, visto que alguns destes produtos apresentam a necessidade de fontes de energia ou tecnologias de coleta de energia, como materiais fotovoltaicos e piezoelétricos.

Ademais, os sistemas inteligentes a base de fibras, tornam-se atrativos pelas características únicas apresentadas pelos substratos fibrosos, como a resistência mecânica para suportar constantes deformações de compressão e tração, capacidade de lavagem, maleabilidade e leveza. Os polímeros condutores desempenham um papel interessante no ao possibilitar este desenvolvimento, ao apresentarem propriedades semelhantes aos têxteis, como flexibilidade, boa resistência mecânica, condutividade elétrica e resistência térmica (MERLINI, 2012).

Desta forma, busca-se desenvolver têxteis inteligentes com base em substratos de fácil acesso e boas propriedades estruturais e de conforto.

Neste contexto, o desenvolvimento do presente trabalho se torna efetivo para o estudo de superfície têxtil de malha jersey de algodão a partir da funcionalização deste material pelo método de polimerização *in situ* do polipirrol (PPy) em diferentes concentrações e tempos de polimerização. Por fim, o ciclo de vida do produto será avaliado após ensaios de lavagem.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é funcionalizar uma malha jersey de algodão pelo método de polimerização *in situ* do pirrol líquido, variando sua concentração e tempo de polimerização, para o desenvolvimento de um têxtil inteligente.

1.1.2 Objetivos específicos

Para responder ao objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Investigar a funcionalização de malha jersey de algodão pelo método de polimerização *in situ* do polipirrol (PPy);
- Determinar a condutividade elétrica das malhas jersey de algodão em diferentes tempos e concentrações de polimerização;
- Analisar o comportamento mecânico de tração da estrutura jersey de algodão antes e após a funcionalização;
- Avaliar o comportamento condutivo da malha jersey de algodão funcionalizada com PPy frente a diferentes ciclos de lavagem do substrato.

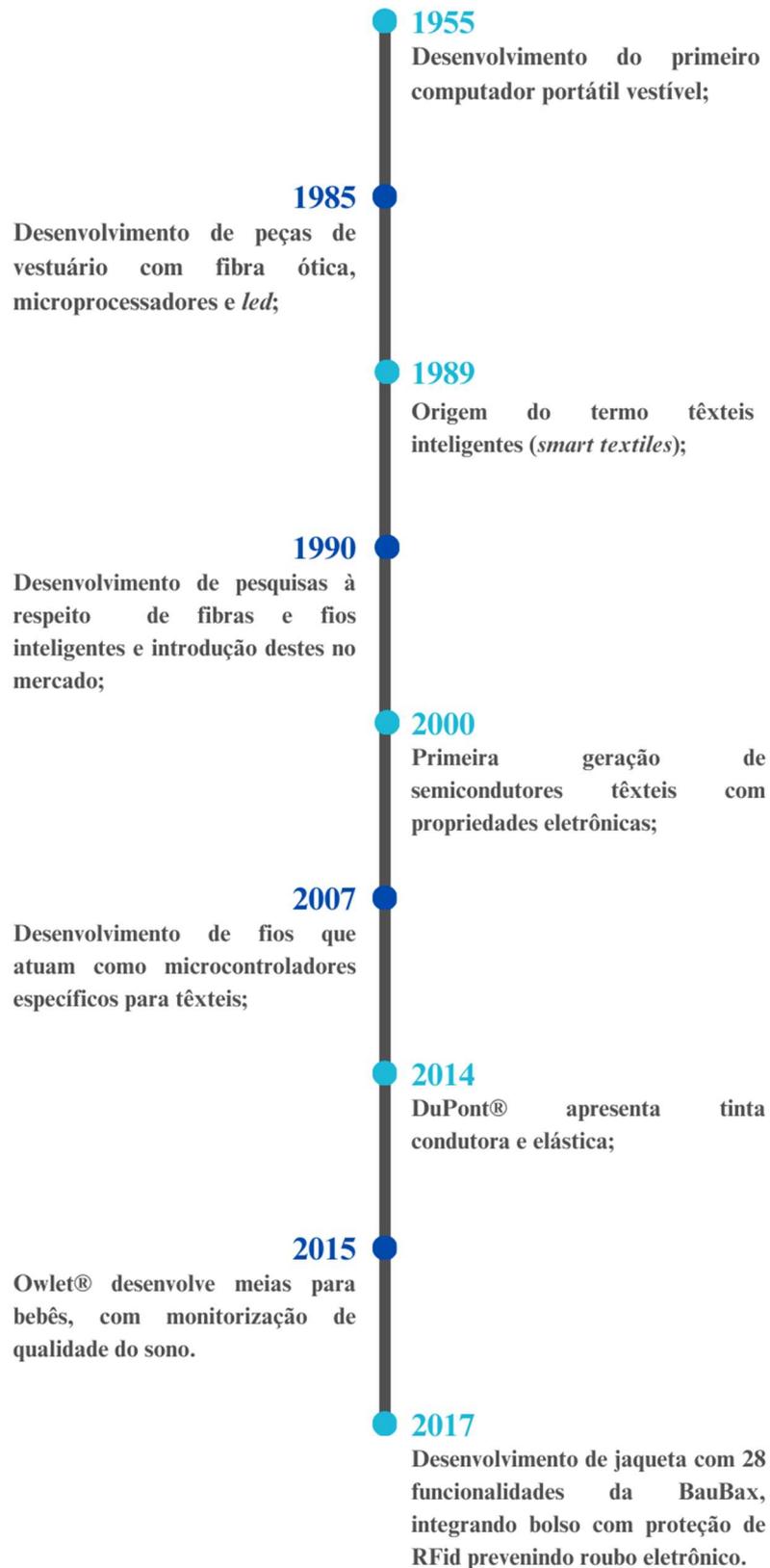
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação do tema abordado neste trabalho de conclusão de curso.

2.1 TEXTEIS INTELIGENTES

Os artigos têxteis são elencados em três principais campos de atuação, a citar: vestuário, têxteis-lar e têxteis técnicos. Estes ramos são responsáveis por grande parte da economia do setor. Com o avanço da tecnologia, uma subcategoria dos têxteis técnicos se tornou emergente e se consolidou no mercado, os têxteis inteligentes (CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012). A Figura 1 ilustra uma linha do tempo elaborada a partir de Koncar (2016), Syduzzaman (2015) e Parachuru (2018), com marcos históricos a respeito dos têxteis inteligentes com ao longo do tempo.

Figura 1 – Linha do tempo dos têxteis inteligentes eletrônicos.



Fonte: O autor.

A classe de têxteis inteligentes é caracterizada por apresentar materiais sensíveis a estímulos, como mudança de temperatura, mudança de pH, interação química, ação mecânica, entre outros (HAMADEH & AL-HABAIBEH, 2022; JÚNIOR, 2022). São classificados como o futuro da indústria têxtil por apresentarem caráter interativo e de monitoramento (JÚNIOR et al., 2022). Estes materiais apresentam potencial de combinar diferentes tecnologias, incorporando ciência e *design*. O desenvolvimento de dispositivos deste calibre envolve diversas áreas do conhecimento, sendo multidisciplinar e complexo. Requer a integração de processos têxteis convencionais, conhecimentos sobre componentes eletrônicos, geração, produção e distribuição de energia elétrica, além de noções sobre mecânica (SYDUZZAMAN, 2015; SCHWARZ, 2010). A concepção deste conceito é abrangente e dependente de fatores como a matéria-prima utilizada e a estrutura no qual o produto será confeccionado. No entanto seu cerne está em sua aplicação, o qual guiará o seu desenvolvimento (RASHEED, 2020).

Este segmento da indústria têxtil pode ser classificado em três categorias: passivos, ativos e muito inteligentes. Os passivos correspondem os materiais que apresentam características funcionais que não dependem do ambiente em que estão inseridos; sua propriedade que o classifica como inteligente está presente no substrato têxtil sem uma ação externa, como por exemplo, os tecidos com proteção antimicrobiana. Os ativos são caracterizados por sentir e responder a um estímulo do meio, sendo utilizados como sensores e atuadores. A categoria dos têxteis muito inteligentes corresponde aos materiais capazes de detectar mudanças externas, reagir e se adaptar às condições necessárias, ou desejáveis (KONGAHAGE, 2019). Na Figura 2 é possível observar as três categoriais de têxteis inteligentes de forma ilustrativa.

Figura 2 – Classificação dos materiais têxteis inteligentes.



Fonte: Adaptado de MAESTRI (2022).

A classificação dos materiais têxteis inteligentes pode ser feita também quanto ao seu grau de complexidade e integração com o próprio substrato. Bosowski et al. (2013) classificaram os têxteis inteligentes entre adaptados ao têxtil, integrados ao têxtil ou baseados no têxtil. A primeira categoria contempla os produtos que não apresentam uma função eletrônica, mas os componentes eletrônicos são adicionados à peça, como por exemplo, um bolso para adicionar um dispositivo MP3 que conecta à um cabo ligado ao fone de ouvido na parte da touca do produto. Os integrados ao têxtil são dispositivos onde o substrato contém de 0 a 99 % das funções eletrônicas, criando uma interface entre essas duas partes, como exemplo as placas de circuito que podem ser integradas no substrato supracitado. A última classificação se concentra em um material têxtil cuja função eletrônica é 100 % realizada pelo substrato, envolvendo a criação de pontos condutores por meio de fios condutíveis (BOSOWSKI, 2013).

Pode-se destacar ainda que é esperado que o mercado dos têxteis inteligentes, segundo a Markets and Markets (2023) cresça de USD 2.3 bilhões em 2021 para USD 6.6 bilhões até 2026, com um crescimento anual acumulado de 23,2 % durante o período.

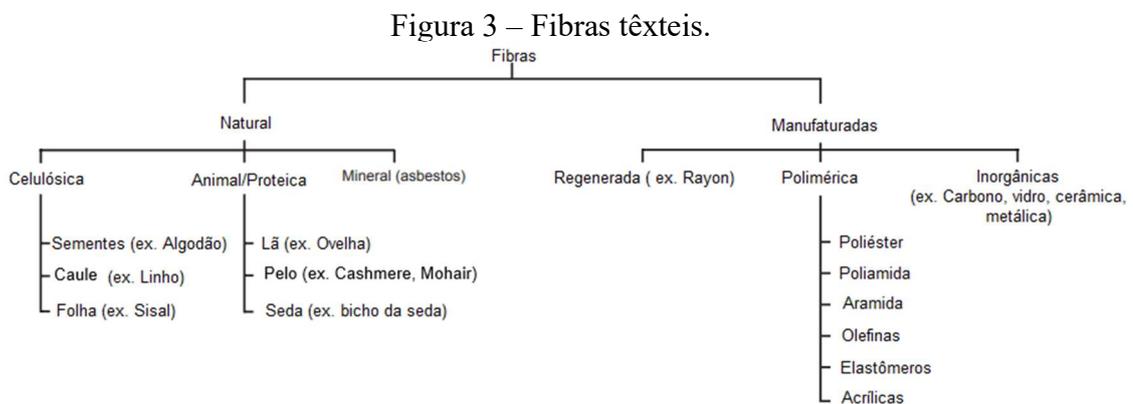
2.2 FIBRAS TEXTEIS

As fibras têxteis são compreendidas como a origem de todo o substrato têxtil. São caracterizadas por apresentarem elevada relação entre o diâmetro e o comprimento. A partir

disso, as fibras têxteis podem ser classificadas como contínuas, comumente chamadas de filamentos, ou podem também ter um comprimento reduzido ou determinado, intituladas de fibras descontínuas (HOUCK, 2009).

A diferenciação destas fibras se torna relevante para definir o tipo de tratamento pelas quais passarão. Os filamentos são geralmente combinados e torcidos para a formação do fio; já as fibras descontínuas são direcionadas à fiação para serem fiadas (ELMOGAHZY, 2020)

Além de sua diferenciação a respeito do comprimento, as fibras também são divididas em grupos de acordo com sua origem (Figura 3).



Fonte: Adaptado de ELMOGAHZY (2020)

2.2.1 Fibra de algodão

O algodão é uma fibra celulósica de origem natural com características únicas. Seu sucesso é proveniente de sua uniformidade de comprimento e maturidade, garantindo um toque agradável, grande capacidade de absorção, boa resistência mecânica e a lavagens (SANTANA et al., 1999; MEDEIROS, 2016). O algodão é a fibra celulósica mais versátil entre as fibras têxteis, permeando pelo setor de vestuário, até aplicações funcionais e técnicas (CALDEIRA, 2012). De acordo com a Associação Brasileira dos Produtores de Algodão (ABRAPA), o consumo mundial de algodão está projetado para crescer a uma taxa anual de 1,8 %, atingindo 28,1 milhões de toneladas em 2032 (ABRAPA, 2023).

Além de suas características morfológicas serem muito atrativas para o setor do vestuário, substratos têxteis produzidos a partir de fibras de algodão são amplamente utilizados em aplicações técnicas e para a funcionalização de superfícies. Neste sentido, vários estudos são abordados na literatura com o objetivo de agregar valor e aprimorar as propriedades dos materiais fibrosos de algodão.

Meganathan et al. (2022) utilizaram polianilina (PANI) para funcionalizar o tecido plano de algodão e adquirir propriedades antibacterianas e fotocatalíticas sob o substrato. Os autores obtiveram resultados positivos e otimizados de uma superfície têxtil com propriedade super hidrofóbica e capaz de se auto limpar, bem como atividade antimicrobiana elevada.

Gauche et al. (2022) funcionalizaram substratos têxteis com agentes hidrocrômicos, atingindo resultados satisfatórios no desenvolvimento de um têxtil inteligente a partir da matéria-prima de algodão.

Liang et al. (2022) produziram um super capacitor a partir de fibras de algodão utilizando PPy, partículas de prata e óxido de grafeno. Esta funcionalização foi obtida a partir da polimerização via indução ultravioleta e apresentou desempenho eletroquímico e excelente flexibilidade mecânica, demonstrando grande potencial para o desenvolvimento de dispositivos vestíveis para o armazenamento de energia.

Os fios de algodão também são utilizados para a produção e desenvolvimento de têxteis médicos. Li et al. (2020) desenvolveram fios de algodão torcidos sensíveis a umidade para simular músculos artificiais, os quais apresentaram boa estabilidade, assim como reversibilidade ao remover ou aplicar umidade nos fios de algodão testados.

Substrato têxtil de algodão foi utilizado também para o desenvolvimento de um artigo multifuncional, combinando proteção antimicrobiana e condutividade elétrica. No trabalho desenvolvido por Mohamed et al. (2021) investigou-se o desenvolvimento de um substrato têxtil com as propriedades supracitadas a partir da funcionalização de nanopartículas (NPs) de polipirrol, óxido de titânio e silicone (PPy/TiO₂ NPs/silicone), depositadas sobre a superfície do material. Como resultado, foi possível observar uma melhora na condutividade elétrica e boa eficiência antibacteriana, e os autores conseguiram boa adesão das nanopartículas até 20 lavagens do substrato.

Portanto, observa-se que além de aplicações no setor de vestuário é possível utilizar substratos têxteis de algodão para desenvolver soluções inovadoras e inteligentes nas mais diversas áreas de aplicação.

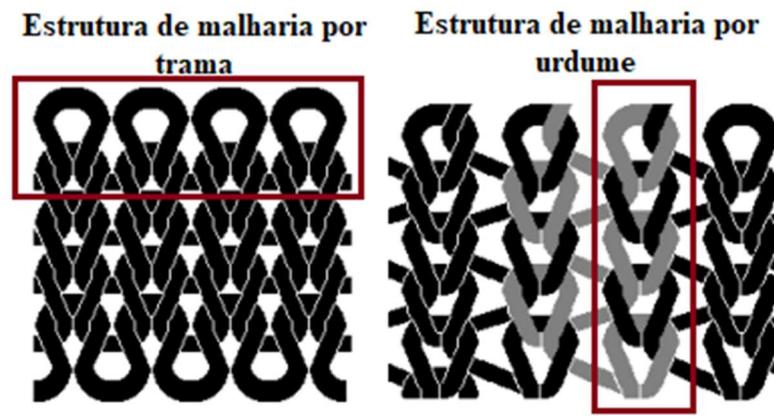
2.3 TECNOLOGIA DE MALHARIA

Dentre as diversas superfícies têxteis disponíveis no mercado, a malharia se apresenta como uma tecnologia que requer fibras relativamente finas, resistentes mecanicamente e com boas propriedades elastoméricas (SPENCER, 2001). Os tecidos de malha são caracterizados

por apresentarem elevada flexibilidade, ocasionada devido a estrutura de laçada que forma a malha e proporciona conforto, como ocorre no vestuário, por exemplo (ZHANG; MA, 2018)

A malharia se destaca por desenvolver os mais diversos produtos. O seu desenvolvimento pode se dar a partir de dois grandes métodos: malharia por trama e malharia por urdume. A distinção estrutural se dá pela direção da evolução do fio, em que a malharia por trama o fio é disposto na direção horizontal (na direção das fileiras/carreiras ou cursos), e na malharia por urdume ocorre na vertical, na direção das colunas (FAIRHUST, 2008). A Figura 4 ilustra os dois tipos de construção de malha: por trama e por urdume.

Figura 4 – Tipos de malharia.



Fonte: Adaptado de Fairhust, 2008.

A partir da combinação de diferentes tipos de laçada, ou pontos, obtêm-se diferentes estruturas e conseqüentemente propriedades e aplicações distintas, que podem ser utilizadas tanto no vestuário, quanto nos têxteis-lar ou em aplicações técnicas (AU, 2011).

De acordo com Spencer (2001), existem quatro estruturas básicas (raporte) que dão origem a todas as malhas por trama, sendo elas jersey, rib, interlock e ponto esquerdo. No presente trabalho serão abordados procedimentos experimentais com malha de estrutura jersey.

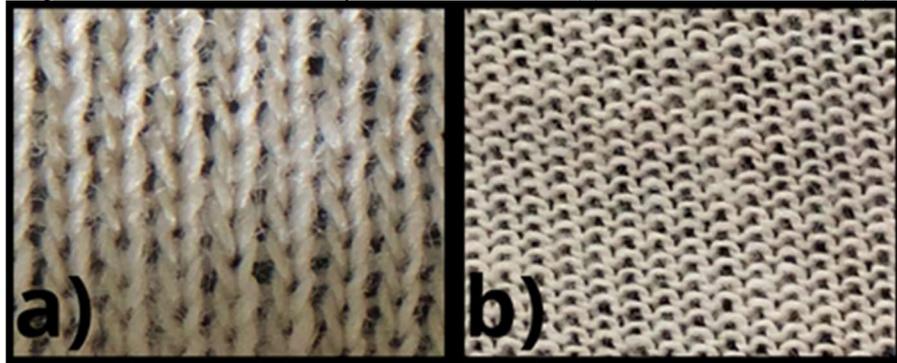
2.3.1.1 Jersey

O raporte jersey, comumente chamado de meia-malha, tem grande notoriedade por se a estrutura de malha por trama com o maior grau de facilidade para se produzir (SPENCER, 2001).

O direito técnico da malha jersey (Figura 5-a) é caracterizado por apresentar as pernas das laçadas e ofuscar a cabeça da laçada anterior. Desta forma, as colunas formadas acabam se

tornando mais visíveis no direito técnico. O avesso técnico (Figura 5-b) consiste no oposto do direito técnico, sendo que as cabeças das laçadas são visíveis e as pernas ficam por debaixo da cabeça da laçada anterior.

Figura 5 – Estrutura Jersey: direito técnico (a) e o avesso técnico (b).



Fonte: O autor.

Assim, pelo fato da malha jersey apresentar uma configuração mais simples quando comparada aos outros raportes de malhas por trama, o tear utilizado para a sua produção também é mais econômico. Isso se deve ao menor tempo de *setup* ser menor, podendo suportar maiores velocidade de produção e maior número de alimentadores (BENVENUTI, 2021).

Por apresentar elevado volume de produção, a meia malha é produzida majoritariamente em teares circulares para a confecção de tecido de malha. De acordo com Power (2012), estima-se que $\frac{1}{5}$ de toda a produção de artigos têxteis pela malharia circular seja destinada à confecção de malhas jersey para camisetas. Desta forma, a utilização de malha jersey para o desenvolvimento de têxteis inteligentes é uma escolha vantajosa por ser caracterizada como uma malha comum e de elevada produção, tornando o acesso a esta tecnologia mais acessível.

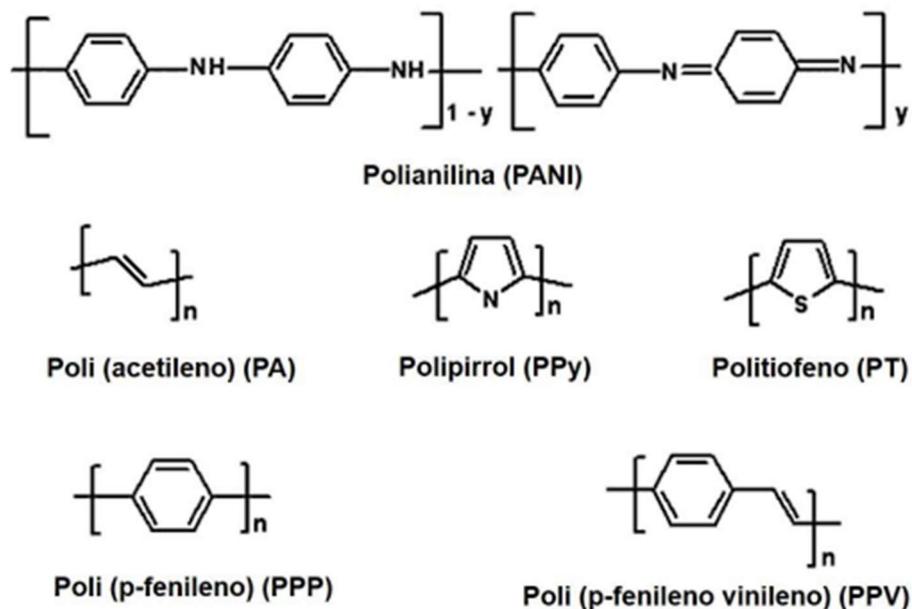
2.4 POLÍMEROS INTRINSECAMENTE CONDUTORES

Os polímeros, até a década de 70, eram considerados materiais isolantes ou semicondutores. O marco inicial em termos de publicação para o desenvolvimento de polímeros intrinsecamente condutores (PICs) ocorreu em 1977. Neste trabalho, foi evidenciada a possibilidade de conferir condutividade elétrica em polímeros por meio de uma oxidação do poli (trans-acetileno) com bromo, cloro ou vapor de iodo (MEDEIROS et al., 2012).

Os polímeros intrinsecamente condutores têm propriedades típicas de materiais metálicos, como elétricas, óticas e magnéticas, mas mantém características morfológicas de

materiais poliméricos, como a leveza, facilidade de moldagem, flexibilidade e sua constituição é uma cadeia orgânica conjugada, contendo ligações simples (C-C) alternadas com ligações duplas (C=C) (BHADRA et al., 2009). Na Figura 6 pode-se observar a estrutura química dos principais PICs encontrados na literatura: a polianilina (PANI), o poli (acetileno) (PA), o polipirrol (PPy), politiofeno (PT), poli (p-fenileno) (PPP) e o poli (p-fenileno vinileno) (PPV).

Figura 6 – Estrutura química dos monômeros dos principais PIC's.



Fonte: Adaptado de Bhadra et al., 2009.

O controle durante o processo de manufatura permite a obtenção de diferentes valores de condutividade elétrica para estes polímeros, possibilitando aplicações em múltiplos setores tecnológicos (MERLINI, 2014). Destacam-se em pesquisas acadêmicas o PPy e a PANI por apresentarem melhor processabilidade, estabilidade ambiental e térmica (KIM, 2021). Polímeros como o polipirrol e a polianilina requerem reações de redução ou oxidação para seu estado condutor ser exposto.

Os PICs em sua forma não dopada são materiais isolantes com condutividade elétrica geralmente inferior a 10^{-10} S/cm. Após a oxidação ou redução da cadeia eles passam a ter propriedade condutora, atingindo intervalos de condutividade típicos de materiais semicondutores ou condutores. Os PICs dopados podem alcançar valores de condutividade na ordem de 10^6 S/cm, semelhantes ao cobre (OUYANG et al., 2021).

Polímeros como poli(acetileno) e polipirrol são descritos pelos elétrons que são retirados no pico da banda de valência, formando espaços vazios e facilitando o deslocamento

destes elétrons na cadeia polimérica. Assim, para o polímero passar do estado isolante para um material condutor, é necessária maior quantidade de agente oxidante/redutor durante a dopagem (MEDEIROS, 2012).

2.4.1 Polipirrol

O polipirrol é um polímero muito estudado devido sua capacidade de troca iônica, caráter hidrofóbico e excelente estabilidade térmica quando comparado a outros PICs, como por exemplo, a PANI. Este polímero apresenta também facilidade de síntese e pode alcançar valores de condutividade elétrica elevados, através das mudanças realizadas nas condições de síntese (LIU, 2019).

Estas propriedades permitem que o PPy tenha grande potencial de aplicação em campos de tecnologia avançada, destacando-se para dispositivos nanoeletrônicos e para armazenamento de energia. Além disso, o PPy é amplamente utilizado no desenvolvimento de tecidos para a produção de têxteis inteligentes, proporcionando a condução de energia para os sensores (RAMÔA, 2015).

Este polímero pode ser obtido através da síntese química do pirrol (Py) (CAMARGO, 2019). A obtenção do polipirrol por esta via facilita a produção em larga escala com um baixo custo. A técnica de polimerização utilizando o cloreto férrico (III) como agente oxidante é a mais utilizada, permitindo a obtenção do PPy com elevados valores de condutividade elétrica, quando comparado com outros agentes aniônicos ou catiônicos, como por exemplo o ClO_4^- , Na^+ ou partículas maiores de polímeros como os polieletrólitos, poli (ácido estireno sulfônico) (PSS) e o poli (ácido vinil sulfônico) (PVS) (RAMOA, 2015; GRANCARIĆ et al., 2018).

Babu et al (2013) realizaram um estudo relativo à comparação das funcionalizações de várias estruturas têxteis utilizando o polipirrol. Para a obtenção desta superfície, utilizou-se o processo de polimerização *in situ* com o cloreto de ferro hexahidratado (III) como agente oxidante para obtenção do polipirrol. Ao final, a estrutura têxtil é revestida com uma fina camada polimérica adsorvida fisicamente, promovendo adesão do polímero com o substrato.

Xie et al. (2019) variaram diferentes proporções de concentração do monômero pirrol juntamente com o cloreto férrico em tecidos de algodão, e realizaram ensaios de resistência à tração, condutividade e teste eletrotérmico dos tecidos funcionalizados. Foi verificado que os tecidos de algodão funcionalizados polipirrol apresentaram valor superior aos tecidos de algodão não funcionalizados, bem como atingiram uma baixa resistividade e uma temperatura máxima, sob tensão de 5V, de 168,3°C. Demonstrando que os tecidos funcionalizados com

polipirrol apresentaram elevadas propriedades térmicas, elétricas e mecânicas, torna-se possível utilizar estes substratos como elementos no desenvolvimento de aquecedores flexíveis a partir de substratos têxteis.

Chen et al. (2019) desenvolveram um dispositivo inteligente a base de malha por urdume recobrando-a com polipirrol por meio da polimerização interfacial em baixa temperatura, com o objetivo de desenvolver um dispositivo capaz de medir esforço mecânico. Foram monitorados movimentos como a dobra do joelho, cotovelo e dedos da mão, dependendo da localização do sensor, bem como a respiração humana ao acoplar o dispositivo inteligente na parte abdominal do voluntário. Observou-se que o substrato, durante os ensaios de estresse mecânico apresentou boa resistência. Quando inserido em contato com o corpo humano verificou-se que o sensor demonstra sensibilidade para detectar movimentos dos dedos, cotovelos e joelhos, além de diferenciar padrões de respiração, como a respiração profunda, normal e rápida.

Para o desenvolvimento também de têxteis inteligentes com aplicações em dispositivos vestíveis, foram desenvolvidas membranas piezoelétricas de poli (fluoreto de vinilideno) PVDF com deposição de PPy em sua superfície. Baik et al. (2019) concluíram que a camada de polipirrol na superfície da membrana aumentou a resistência à oxidação, bem como a camada hidrofóbica do polímero permaneceu condutiva mesmo após o contato com a água.

Maestri et al. (2023) desenvolveram um dispositivo multicamadas piezoelétrico, com duas camadas exteriores de malha jersey de poliéster funcionalizadas a partir da polimerização *in situ* de PPy. Os autores obtiveram resultados promissores na utilização de malhas por trama funcionalizadas para o desenvolvimento de dispositivos inteligentes vestíveis.

Dou et al. (2022) funcionalizaram malhas *spacer* a partir da polimerização *in situ* do polipirrol e deposição de nanotubos de carbono para aplicação de malhas em sensores de deformação, com propriedades eletroquímicas e aquecedoras promissoras para o desenvolvimento de têxteis inteligentes vestíveis.

Mendes (2019) fez a polimerização *in situ* do pirrol e do poli(3,4-etilenodioxítiofeno) (PEDOT) em malha por urdume e ãotecido de poliéster. As malhas polimerizadas foram submetidas a ensaios de lavagem (10 ciclos de lavagens), e testes de abrasão, simulando a utilização do substrato têxtil no uso diário. O autor obteve resultados significativamente menores de condutividade após as lavagens e testes de abrasão, concluindo que estes substratos foram severamente degradados nas operações diárias de lavagem e usabilidade.

A partir dos fatos anteriormente apresentados o desenvolvimento de têxteis inteligentes funcionalizados com polipirrol é efetivo. No entanto, destaca-se que o ensaio de adesão do PPy

frente a ciclos de lavagem não foi realizado em malhas por trama com estrutura jersey de algodão. Os testes foram conduzidos principalmente em fibras sintéticas, ou quando realizados em algodão, foram adicionados à funcionalização do substrato foram dióxido de titânio e silicone, o que pode gerar divergência de resultados. Portanto, há de se enfatizar a importância do desenvolvimento deste trabalho, no contexto de têxteis inteligentes com a utilização de malhas por trama no raporte jersey de algodão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos empregados para o desenvolvimento deste estudo.

3.1 MATERIAIS

A malha jersey 100 % algodão (CO) utilizada foi disponibilizada pela empresa RVB Malhas. Para a funcionalização desta malha foi utilizado o polímero condutor PPy. Sua aplicação consiste numa fina camada condutora externa à superfície têxtil. Para a polimerização e obtenção do PPy utilizou-se cloreto férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) da marca Dinâmica e pirrol líquido da marca Sigma-Aldrich.

3.2 MÉTODOS

Nesta seção é abordado os métodos de ensaio utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, sendo estes a caracterização da malha, polimerização do substrato e análises.

3.2.1 Caracterização da malha por trama jersey de algodão

As caracterizações realizadas neste trabalho referem-se ao procedimento de caracterização estrutural dos substratos realizados no Laboratório de Tecidos e Malhas (LABTEC) da UFSC.

3.2.1.1 Espessura

A espessura da malha foi analisada com o auxílio de um paquímetro manual da marca Insize, modelo Vernier Caliper. A verificação ocorreu a partir da dobragem da amostra até atingir 6 camadas, então foi medido em triplicata, e o resultado dividido pelo número de camadas para se obter o valor da espessura da malha.

3.2.1.2 Comprimento de laçada

O comprimento de laçada das malhas foi analisado a partir da contagem de 100 colunas das amostras. A seguir, o substrato foi desmalhado/desconstruído e o comprimento da laçada foi medido com o auxílio do equipamento *Maillimeter*, no LABTEC-UFSC.

3.2.1.3 Número de carreiras e cursos

O número de carreiras e cursos foi analisado de acordo com a norma técnica ABNT NBR 12060:1991 – Materiais têxteis: Determinação do número de carreiras/cursos em tecidos de malha, Método de ensaio. A densidade da malha foi calculada a partir do produto do número de colunas e carreiras por unidade de comprimento, neste caso centímetros (Equação 1).

$$Densidade \left(\frac{\text{pontos}}{\text{cm}^2} \right) = \frac{n^{\circ} \text{ de colunas}}{\text{cm}} \times \frac{n^{\circ} \text{ de carreiras}}{\text{cm}} \quad (1)$$

3.2.1.4 Gramatura

As malhas por trama foram analisadas quanto à sua gramatura, seguindo a norma técnica ABNT NBR 10591:2008 – Materiais têxteis – Determinação da gramatura de superfícies têxteis (cálculo conforme a Equação 2). A verificação da gramatura média ocorreu em triplicata.

$$Gramatura \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right) = \frac{\text{Massa (g)}}{\text{Área (m}^2\text{)}} \quad (2)$$

3.2.1.5 Título do fio

O cálculo do título do fio da malha foi realizado de acordo com a norma NBR 13214 – Determinação do Título do Fio, no qual se utilizou o sistema de cálculo indireto, ou seja, o título é inversamente proporcional ao diâmetro do fio. Para isso foi utilizada uma balança analógica de 4 casas decimais da marca Even e aproximadamente $1 \pm 0,2$ m do fio das malhas. Após calcular a massa do fio, foi realizada a relação com a constante $K = 0,59$ g/m, portanto o título do fio é dado em Ne.

3.2.1.6 Fator de cobertura

O cálculo do fator de cobertura foi realizado a partir da Equação 3.

$$FC = \frac{\sqrt{tex}}{l} \quad (3)$$

Onde:

tex = título do fio em tex;

l = comprimento da laçada em cm

3.2.2 Polimerização *in situ* do pirrol

Durante o processo de polimerização, a malha por trama utilizada foi submersa em banho aquoso e submetida à polimerização *in situ* do pirrol, assim como a metodologia reportada em trabalhos anteriores pelo grupo de investigação, como de Maestri (2022). Foram aplicadas como condição padrão as molaridades de 0,2 mol de FeCl₃ para 0,1 mol de Py conforme mencionado no trabalho de Maestri et al. (2023). A partir da definição da quantidade de mols padrão, pretendeu-se investigar a redução em ¼ e ⅛ do padrão. Ressalta-se que não foram utilizadas concentrações superiores por apresentarem “esfarelamento” do polímero ao manusear as amostras. Outra variável considerada consistiu no parâmetro relativo ao tempo de polimerização, onde se analisou os tempos de 30 minutos e 60 minutos. A escolha desse tempo se deu pelo fato de que em estudos anteriores, após 60 minutos de polimerização, não se verificou nenhum aumento significativo da condutividade elétrica (MERLINI et al., 2013). As condições analisadas estão apresentadas na Tabela 1. A polimerização foi realizada no Laboratório de Transformações e Materiais Avançadas (LTMA)

Tabela 1 – Condições de polimerização

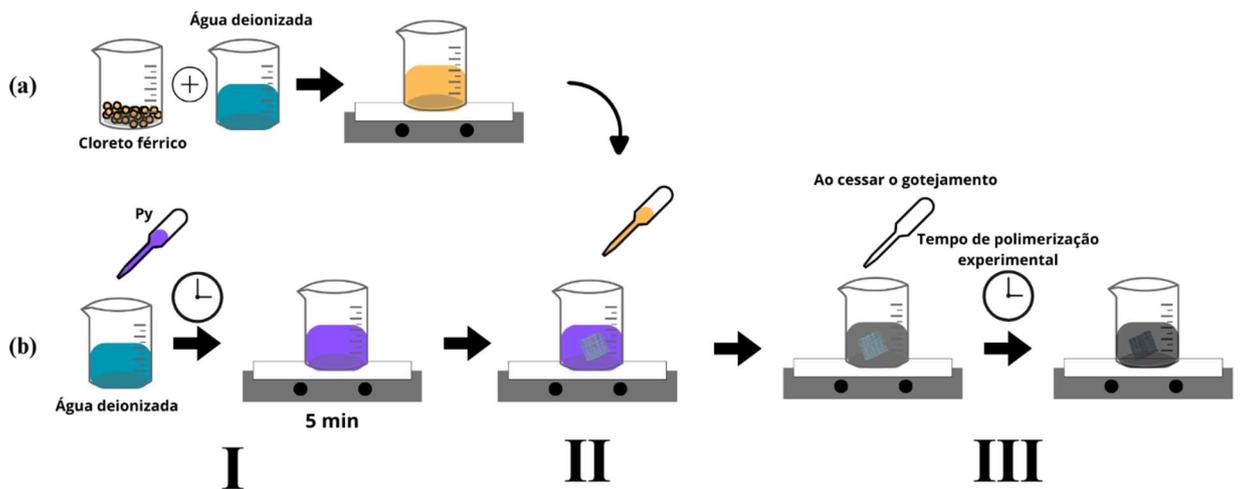
Matéria-prima	Estrutura	Condição de polimerização	FeCl ₃ (mol)	Py (mol)	Tempo de polimerização (min)
Algodão	Jersey	1/4 padrão	0,050	0,0250	30; 60
		1/8 padrão	0,025	0,0125	

Fonte: O autor.

A Figura 8 ilustra o esquema experimental da polimerização *in situ* do pirrol. Na primeira etapa, o cloreto férrico é dissolvido em água deionizada (Figura 8 – a). Em seguida, ocorre a polimerização do pirrol (Figura 7 – b), onde inicialmente, o pirrol é gotejado em água deionizada e agitado durante 5 minutos (Figura 7 – b; I); então se adiciona a amostra de malha e permanece em agitação durante 15 minutos. Após esse tempo é gotejado a solução de FeCl₃ (Figura 8 – b; II); ao cessar o gotejamento é mantido em agitação por tempo estipulado no

planejamento experimental (Figura 7 – b; III). Ao final do processo a malha é lavada apenas com água deionizada e colocada em estufa a 40° C até secar completamente.

Figura 7 – Esquema experimental de polimerização *in situ* do polipirrol.



Fonte: Autor.

3.2.2.1 Condutividade elétrica pelo método de 4 pontas

As amostras de malha jersey contendo polipirrol foram submetidas à ensaios de determinação da resistividade elétrica pelo método 4 pontas no Laboratório de Polímeros e Compósitos (POLICOM) da UFSC Florianópolis. Neste método é aplicada uma corrente elétrica entre os terminais externos da amostra, sendo utilizada uma fonte de elevada tensão. O equipamento utilizado é da marca Keithley, modelo 6220. A diferença de potencial foi medida entre os terminais internos, com auxílio de um eletrômetro da marca Keithley, modelo 6517 (Figura 8). A condutividade elétrica (σ) (S/cm) foi obtida de acordo com a Equação 4 (MAESTRI, 2022).

Figura 8 – Eletrômetro e fonte de elevada tensão.



Fonte: O autor.

$$\sigma = \frac{I}{V} \cdot \frac{\ln 2}{\pi} \cdot \frac{1}{w} \quad (4)$$

Onde I é a corrente elétrica (A); V é a diferença de potencial elétrico (V), w a espessura do substrato (cm) e $(\ln 2) / \pi$ é um fator de correção.

A resistividade elétrica (ρ) é definido como sendo o inverso da condutividade elétrica (σ), conforme apresentado na Equação 5.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (5)$$

A partir dos resultados de condutividade entre as amostras, foi definida a melhor condição de polimerização com base no desempenho mais elevado de condutividade elétrica. Posteriormente, outras análises foram realizadas, sendo estas a resistência a tração, FTIR e análise de condutividade após lavagem do substrato funcionalizado.

3.2.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia da malha foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura antes e após a funcionalização com o polipirrol. A análise foi realizada em MEV da marca Jeol, modelo

JSM-6390LV, no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME). As ampliações utilizadas para essas análises foram de 100x, 200x, 500x, 1000x e 2000x. O revestimento de ouro foi utilizado para garantir a incidência do feixe de elétrons sobre a amostra durante a análise.

3.2.2.3 Espectroscopia infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Para avaliar a polimerização do PPy na superfície das malhas foi utilizado a técnica de FTIR em refletância total atenuada (ATR). As caracterizações foram realizadas em equipamento Espectrofotômetro Frontier FTIR – Perkin Elmer, no Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE). Foram analisados os espectros obtidos nos comprimentos de onda de 4000 a 600 cm^{-1} , a resolução do equipamento é de 4 cm^{-1} e 16 varreduras.

3.2.2.4 Ensaio de tração

Foram realizados ensaios de tração na malha antes e após o processo de polimerização *in situ* do pirrol para as amostras que apresentaram a melhor condição de polimerização. O teste foi desenvolvido a partir de uma alteração da norma ISO 13934-1: 2016, que consistiu no tamanho dos corpos de prova, que ao invés de possuírem 100 x 100 mm, apresentaram 40 x 40 mm. O equipamento utilizado foi o dinamômetro Instron, presente no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM). Esta análise se faz necessária para a avaliação do comportamento mecânico de tração e alongamento após a polimerização.

3.2.2.5 Lavagem do substrato

O procedimento experimental de lavagem foi realizado no Laboratório de Beneficiamento (LABENE) da UFSC, campus Blumenau. O procedimento seguiu a norma NBR ISO 105-C06:2010, o qual procedeu-se no HT-IR DYER, modelo TC-2200, marca Texcontrol, para realizar a lavagem das amostras. Foi adicionado no caneco uma amostra de malha funcionalizada, água e detergente sem branqueador óptico (4 g/L), sem esferas, durante 30 minutos, com temperatura de 40° C. Para cada amostra foi simulado 1, 5 e 10 lavagens. Todos os ensaios foram realizados em triplicata com o objetivo de se analisar a condutividade elétrica posteriormente as lavagens e verificar seu comportamento simulando a utilização de substrato funcionalizado no dia-a-dia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as discussões dos experimentos realizados. Primeiramente, são discutidos os dados obtidos para a etapa de caracterização da malha, e a seguir são apresentados os resultados do ensaio de condutividade, antes e após a lavagem do substrato, e tração das malhas funcionalizadas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MALHA POR TRAMA

As amostras foram caracterizadas quanto aos parâmetros estruturais a fim de verificar se ela é de fato uma malha comum, de acordo com as informações disponíveis no mercado. A partir da Tabela 2 é possível observar os resultados referentes à medição da espessura da malha jersey de algodão, o qual apresentou uma espessura média de 0,356 mm.

Tabela 2 – Espessura da malha de algodão.

CO		
Amostra	Espessura das camadas dobradas (mm)	Espessura de cada camada (mm)
1	2,00	0,350
2	2,20	0,367
3	2,10	0,350
Média	2,13	0,356
Desvio padrão	0,06	0,010

Fonte: O autor.

Em relação ao comprimento de laçada, na Tabela 3 podem-se visualizar os resultados obtidos para a análise. A malha jersey de algodão apresentou um comprimento de laçada médio de 0,247 cm.

Tabela 3 – Comprimento de laçada da malha de algodão.

Amostra	Comprimento total (cm)	Comprimento de laçada (cm)
1	24,800	0,248
2	24,300	0,243
3	24,900	0,249
Média	24,700	0,247
Desvio padrão	0,320	0,003

Fonte: O autor.

Quanto maior o comprimento da laçada, menor o número de laçadas por unidade de área, e conseqüentemente mais facilmente o substrato pode ser deformado quando há uma força aplicada sobre ele.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de fileiras e colunas por centímetro. A malha apresentou um valor médio de 15,5 fileiras/cm e 22,5 colunas/cm. Ao realizar a multiplicação desses dois valores, obtém-se o valor de densidade, totalizando 344,4 pontos/cm². Destaca-se que quanto maior a densidade, maior a resistência a tração e menor a deformação na malha (CHOI, 2000).

Tabela 4 – Densidade da malha de algodão.

Amostra	Fileiras/cm	Colunas/cm	Densidade (pontos/cm)
1	15,2	22,0	334,4
2	15,6	23,2	361,9
3	15,6	21,6	337,0
4	15,6	22,4	349,4
5	16,0	23,2	371,2
Média	15,5	22,5	344,4
Desvio padrão	0,2	0,8	15,0

Fonte: O autor.

Na Tabela 5 são apresentados os valores da gramatura e massa das amostras. A gramatura média da malha de algodão é de 164,9 g/m². Este indicador, juntamente com a densidade, pode influenciar fatores como o toque e elasticidade da malha.

Tabela 5 – Gramatura da malha de algodão.

Medidas	Massa (g)	Gramatura (g/m²)
1	0,408	163,2
2	0,411	164,6
3	0,412	164,8
4	0,428	171,0
5	0,402	160,8
Média	0,423	164,9
Desvio padrão	0,025	3,8

Fonte: O autor.

Foi avaliado também o título do fio utilizado na malha. O título médio obtido é 25,6 Ne (Tabela 6).

Tabela 6 – Título do fio da malha de algodão.

Medidas	Comprimento (m)	Massa (g)	Título (Ne)
1	0,80	0,02	23,6
2	0,88	0,02	26,0
3	0,92	0,02	27,1
Média	0,87	0,02	25,6
Desvio padrão	0,06	0,00	1,8

Fonte: O autor.

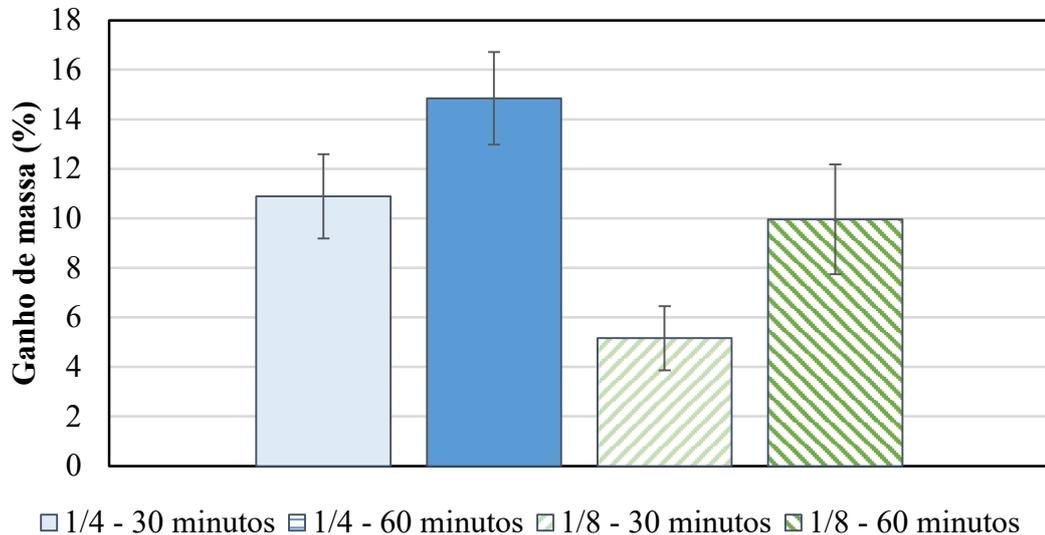
Após os valores de título do fio e comprimento de laçada forem obtidos, foi realizado o cálculo do fator de cobertura, a partir da equação 3. Para isso, foram utilizados os valores de massa do fio e comprimento do fio para se obter o valor do título em tex. O valor de fator de cobertura obtido foi de 19,5 para a malha jersey de algodão.

O fator de cobertura é uma análise que relaciona a área do tecido coberto pelo fio e a área total do tecido. Quanto maior o fator de cobertura, mais fechada e compacta é esta malha. Este indicador é um parâmetro que influencia diretamente a durabilidade, caimento, resistência a abrasão, encolhimento, permeabilidade e estabilidade dimensional (RAY, 2012).

4.2 POLIMERIZAÇÃO *IN SITU* DO PIRROL

Foi realizada a medição do ganho de massa das amostras, isto é, as amostras foram pesadas antes e depois de polimerizadas, assim que saíram da secagem da estufa (Figura 9).

Figura 9 – Média de ganho de massa após a polimerização.

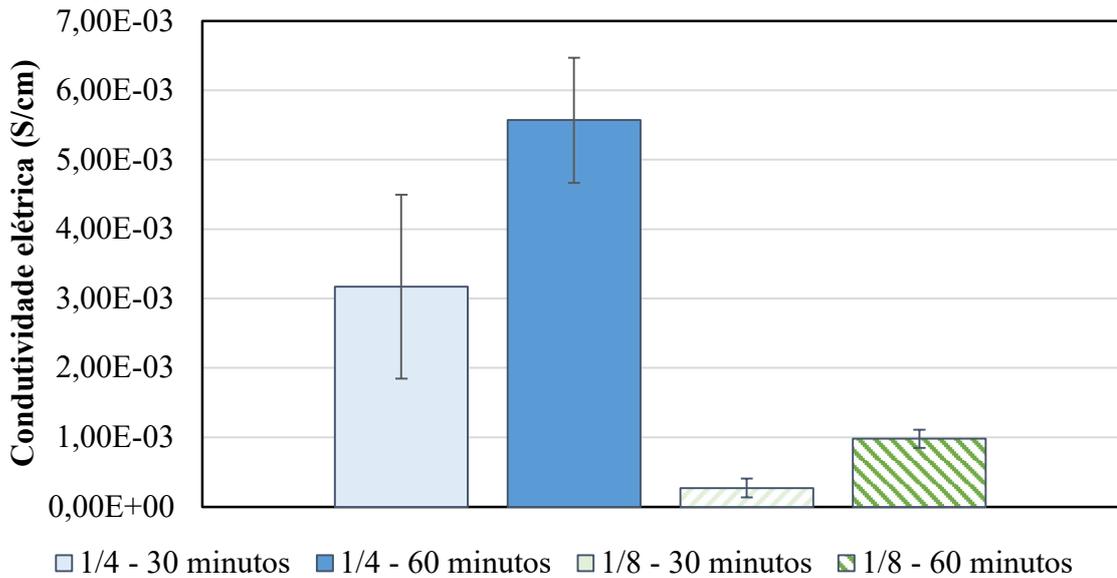


Fonte: O autor.

A partir da análise do ganho de massa das amostras, pode-se observar que a condição de $\frac{1}{4}$ do padrão e 60 minutos de polimerização apresentou o maior ganho de massa (14,85 %) seguido da mesma concentração e tempo de polimerização de 30 minutos (10,89 %). É possível visualizar também que, quando comparadas às concentrações de $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{8}$, o tempo influenciou diretamente no ganho de massa das amostras.

As amostras de malha contendo PPy foram analisadas quanto à sua condutividade elétrica. Os resultados obtidos referentes as amostras de malha com a concentração de $\frac{1}{4}$ apresentaram uma maior média de condutividade elétrica, sendo de 0,00317 S/cm para as amostras de 30 minutos de polimerização e 0,00557 S/cm para 60 minutos. Na Figura 10 é possível observar o gráfico com os resultados das médias de condutividade elétrica obtidos.

Figura 10 – Condutividade elétrica média das amostras.



Fonte: O autor.

A partir da Figura 10 pode-se verificar que quando aumenta o tempo de polimerização, eleva-se também a condutividade elétrica. A partir deste fato, pode-se afirmar também que quanto maior o ganho de massa, maior também a condutividade elétrica, visto que a concentração de $\frac{1}{4}$ com tempo de polimerização de 60 minutos apresentou maior ganho de massa e também maior condutividade elétrica. Este resultado é semelhante com o que foi obtido no trabalho de Dall'Acqua et al. (2004), que concluíram que a condutividade elétrica é diretamente proporcional à massa de polímero no substrato. Destaca-se ainda que os resultados apresentaram dispersão, ocasionados pela operação do equipamento de medição. A este respeito foram excluídas as amostras contidas no primeiro quartil e no quarto quartil.

Outro ponto importante para se mencionar é em relação à ordem de grandeza referente à condutividade. De acordo com Hassabo et al. (2019), o algodão não tratado apresenta caráter isolante, possuindo uma condutividade elétrica média de 10^{-14} S/cm. Portanto ao realizar a comparação do algodão não tratado com o algodão funcionalizado, há uma diminuição de onze ordens de grandeza no resultado final (10^{-3} S/cm), demonstrando resultados em concordância com trabalhos anteriores (MOHAMED, 2021; MAESTRI, 2023).

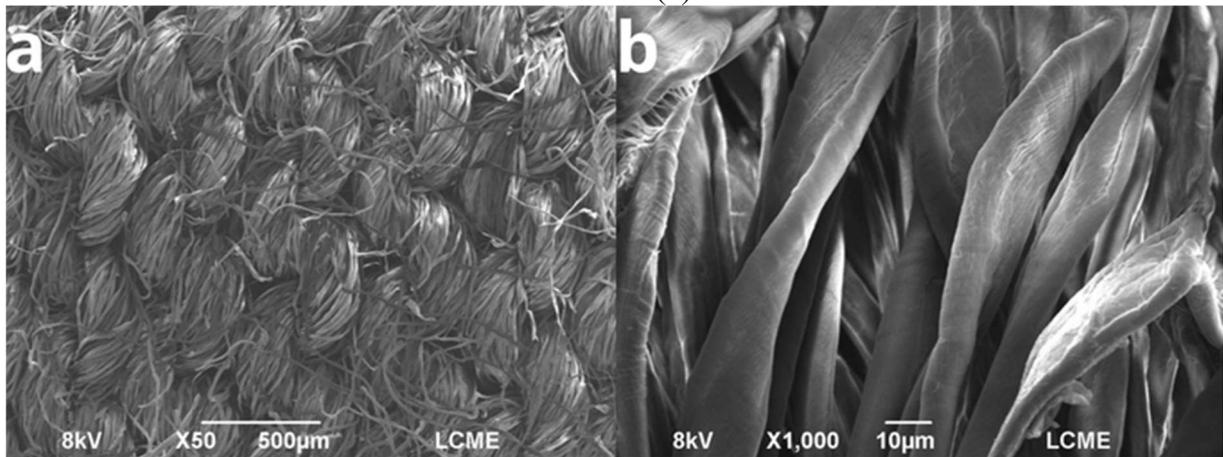
Para as análises subsequentes foi selecionada a amostra com concentração de $\frac{1}{4}$ do padrão e tempo de polimerização de 60 minutos, isto porque apresentou o maior ganho médio de massa e conseqüentemente a maior média de condutividade elétrica.

4.2.1 Microscopia eletrônica de varredura

A análise de MEV permite a análise de comparação da superfície de malha antes e após o processo de polimerização.

A Figura 11 apresenta a estrutura morfológica da fibra de algodão em tecido de malha, podendo ser observado principalmente as fibrilas características da fibra de CO. Destaca-se também na Figura 11-b a presença da estrutura estriada da fibra de algodão bem como seu aspecto delgado característico da natureza da fibra.

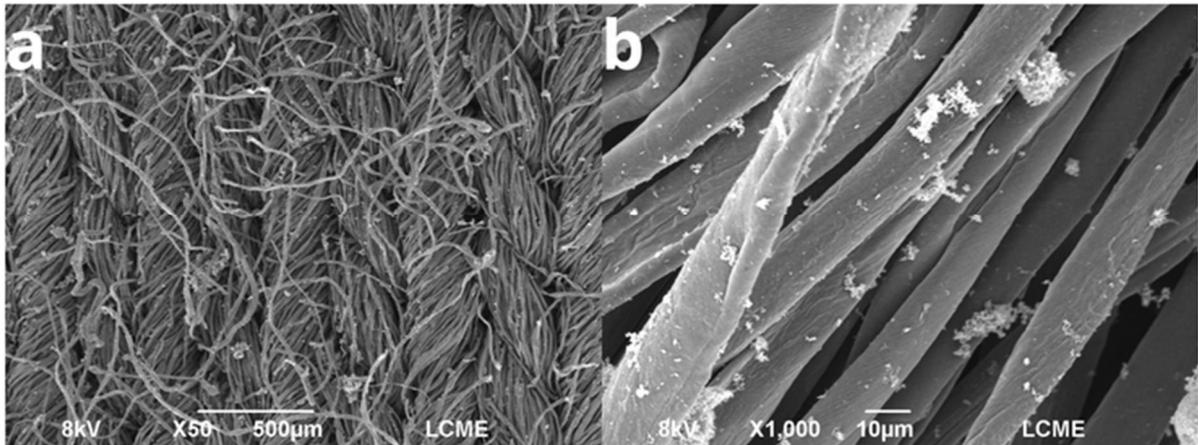
Figura 11 – Análise de MEV da amostra de CO não funcionalizada com ampliação de 50x (a) e 1000x (b).



Fonte: O autor.

Após o processo de funcionalização com PPy, é possível observar na Figura 12 a adesão do polímero à fibra em diferentes ampliações, verificando sua deposição na superfície da malha.

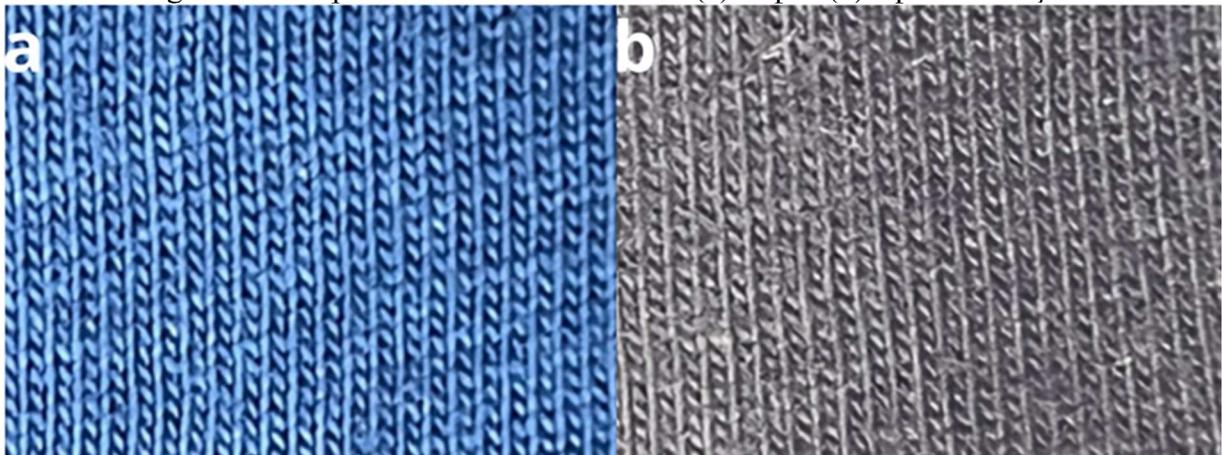
Figura 12 – Análise de MEV da amostra de CO funcionalizada com $\frac{1}{4}$ do padrão e 60 minutos de polimerização com ampliação de 50x (a) e 1000x (b)



Fonte: O autor.

Destaca-se ainda a presença de aglomerações do polímero sobre a superfície do substrato de maneira não uniforme. Para todas as amostras funcionalizadas verificou-se uma mudança visual após a polimerização, apresentando coloração preta escura (Figura 13). Esta coloração preta escura é oriunda do próprio polímero, que apresenta esta coloração ao reagir com o cloreto férrico.

Figura 13 – Aspecto visual da malha antes (a) e após (b) a polimerização.



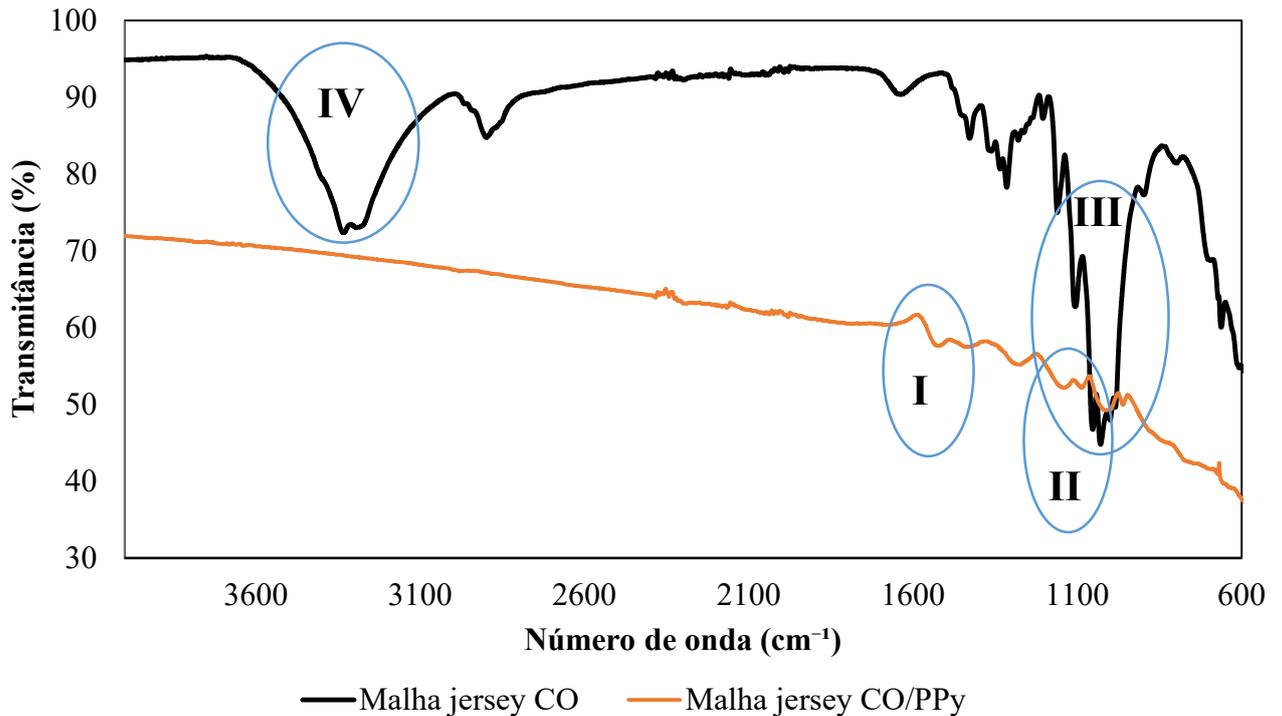
Fonte: O autor.

4.2.2 Espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de FTIR foi realizada para a amostra de malha Jersey de CO antes e após a polimerização, com o objetivo de confirmar a matéria-prima e também a presença do PPy sobre o substrato.

Na Figura 15 pode-se observar o FTIR da malha jersey de CO, como também da malha polimerizada com o PPy. O pico característico em 1535 e 1446 cm^{-1} (Figura 14 – I; I) está associado às vibrações do anel de pirrol, como também a combinação de vibrações e estiramentos de C=C e C-C. As bandas de 1299 e 1166 cm^{-1} (Figura 14 – II) estão associadas às vibrações de C-N. Ademais, as bandas em 1041, 901 e 784 cm^{-1} (Figura 14 – III) são descritas como deformações de C-H, C=C em vibração de dobra plana do anel de pirrol e fora do plano da dobra em C-H, respectivamente (MECERREYES et al., 2002). A larga banda visível na região entre 3700 cm^{-1} e 3000 cm^{-1} (Figura 14 – IV) se refere às vibrações de alongamento dos grupos hidroxila (OH), que são oriundas das ligações de hidrogênio intramolecular na molécula de celulose (ABIDI et al., 2014; LENGOWSKI, 2012).

Figura 14 – FTIR da malha jersey de CO antes e após a polimerização do PPy.



Fonte: O autor.

A partir da Tabela 7 podem-se observar os comprimentos de onda característicos do FTIR para os substratos analisados.

Tabela 7 – Comprimentos de onda característicos do FTIR de CO e CO/PPy.

Número	Comprimento de onda (cm^{-1})	Descrição
I	1535 - 1446	Vibrações do anel de pirrol; Vibrações e estiramento de C=C e C-C

Número	Comprimento de onda (cm ⁻¹)	Descrição
II	1299 - 1166	Vibrações de C-N
III	1041 - 901 - 784	Deformações de C-H; C=C em vibração de dobra plana do anel de pirrol; fora do plano da dobra em C-H.
IV	3700 - 3000	Vibrações do alongamento dos grupos hidroxila (OH)

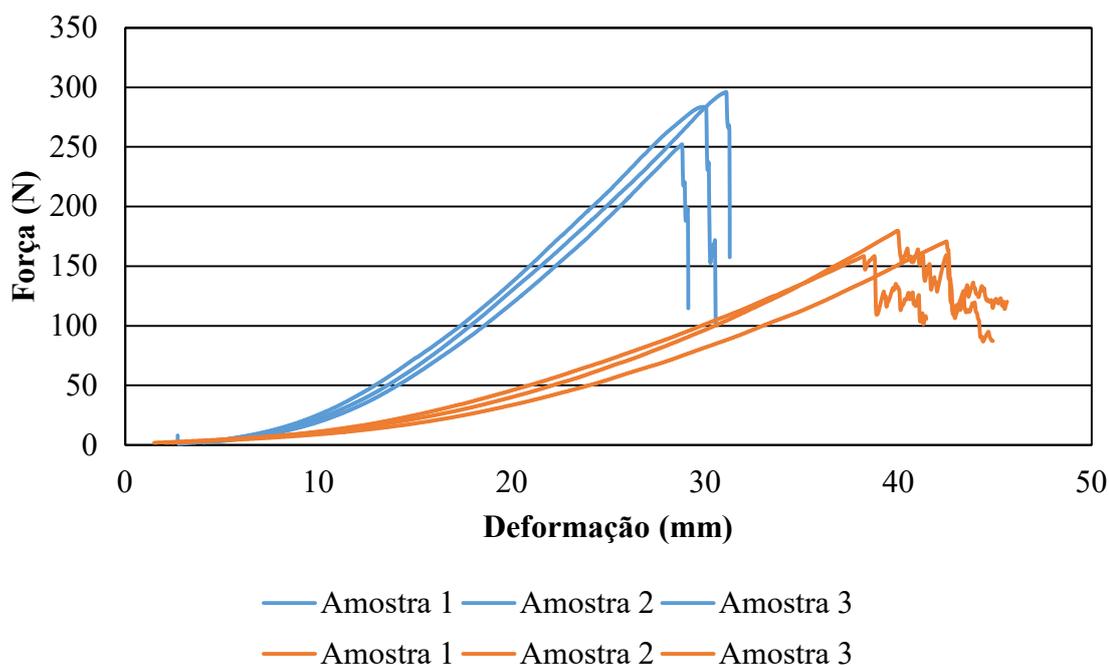
Fonte: Adaptado de (ABIDI et al., 2014; LENGOWSKI, 2012; MECERREYES et al., 2002)

Pode-se verificar a presença de fato na superfície da malha do polipirrol, destacando a diferença do espectro.

4.2.3 Ensaio de tração

Foi realizado o ensaio de tração nas malhas por trama antes e após a funcionalização com PPy, em triplicata. Na Figura 15 é possível observar o ensaio de tração nas malhas por trama de algodão na direção das colunas e fileiras (Figura 15). Pode-se destacar que o comportamento evidenciado indica uma tensão de ruptura média de 277 ± 23 N para o ensaio de tração na direção das colunas (curvas em azul), e uma tensão de ruptura média de 170 ± 11 N para o ensaio na direção das fileiras (curvas em laranja).

Figura 15 – Resistência a tração da malha de CO se funcionalização na direção das colunas e fileiras.

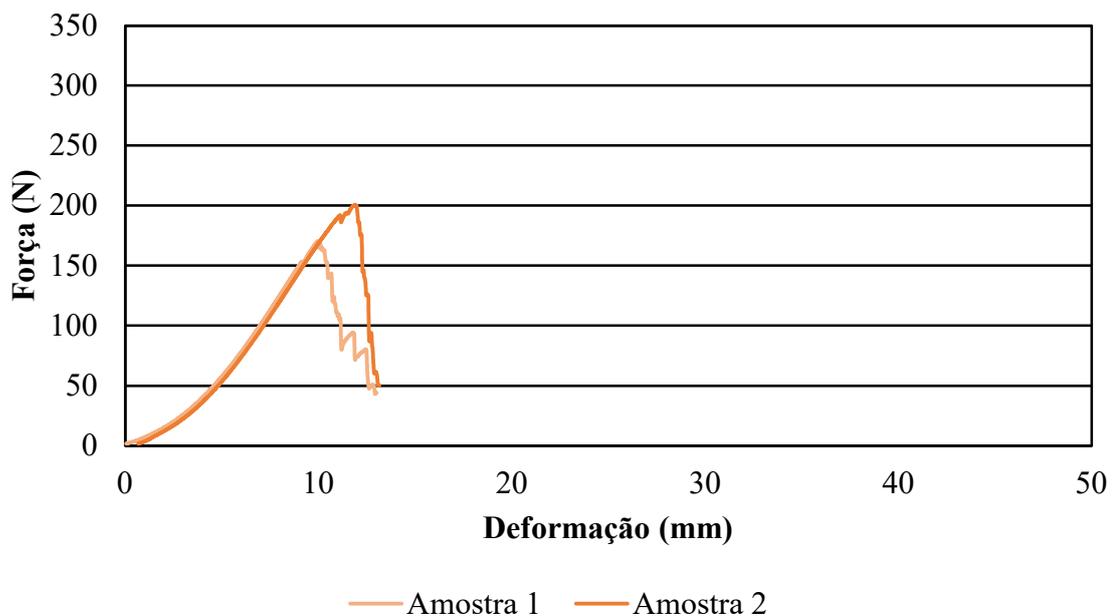


Fonte: O autor.

De acordo com Ray (2012) estruturas de malha no raporte jersey tendem a alongar até 50 % a mais na direção das fileiras do que na direção das colunas. Pode-se destacar ainda que os resultados são compatíveis com resultados em Sitotaw (2017), o qual comparou malhas Jersey simples 100 % CO e malhas CO/Lycra, obteve valor médio de tensão máxima de 220 N na direção das colunas e 159 N na direção das fileiras, com um alongamento de 119 % e 135 %, respectivamente.

Para as amostras funcionalizadas, optou-se por continuar a análise do ensaio de tração na direção das colunas porque nesta direção os valores de tensão de ruptura são mais elevados, o que poderia facilitar para uma possível aplicação do futuro produto. A Figura 16 ilustra as curvas do ensaio de tração para a malha funcionalizada com PPy na direção das colunas.

Figura 16 – Resistência à tração da malha de CO funcionalizada com PPy na direção das colunas.



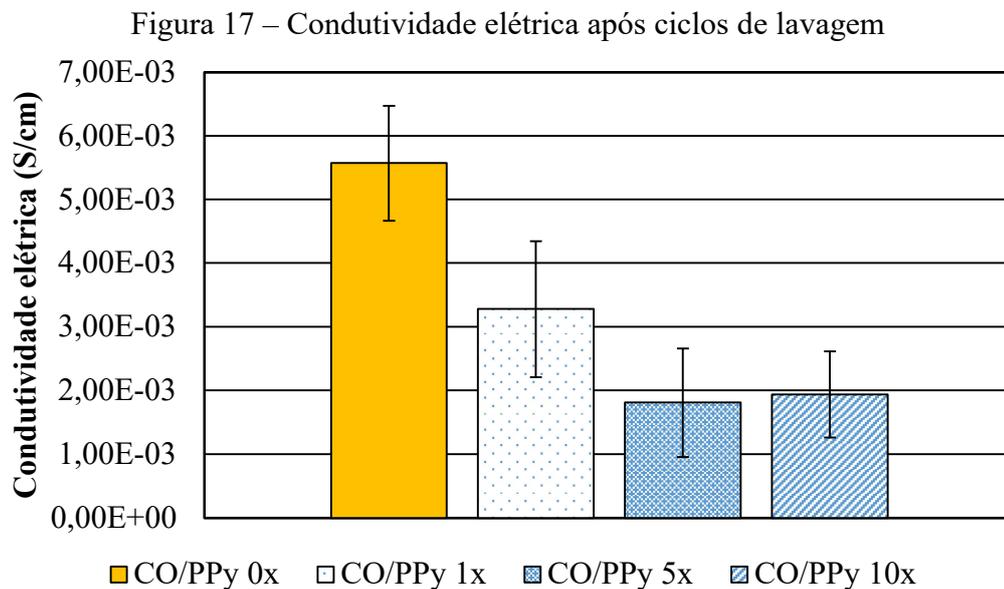
A partir da análise da Figura 16, obteve-se uma média de tensão de ruptura de 193 ± 21 N. A partir disto é possível verificar uma redução no valor médio da força de ruptura, como também da deformação, o que indica uma diminuição de resistência estrutural da malha.

No trabalho realizado por Dou et al. (2022) foi verificado uma redução tanto na deformação quanto na resistência a ruptura do material ao adicionar o polipirrol no substrato. O processo de polimerização é semelhante ao apresentado neste trabalho, porém é utilizado um substrato de poliamida e poliéster.

4.2.4 Lavagem do substrato

As malhas funcionalizadas passaram pelo processo lavagem a partir de diferentes ciclos a fim de verificar a adesão do PPy na malha de algodão após 1, 5 e 10 ciclos de lavagem. A seguir, a análise da condutividade foi verificada novamente.

A Figura 17 ilustra a característica condutiva das malhas antes e após os ciclos de lavagem. É possível concluir que após um ciclo de lavagem houve já uma diminuição de condutividade elétrica por parte das amostras funcionalizadas. Após cinco ciclos de lavagens não houve mudança para o ciclo de dez lavagens quando comparadas as condutividades elétricas. Isto se deve ao fato de que, estatisticamente as amostras apresentaram o mesmo resultado. Vale ressaltar que a ordem de grandeza de 10^{-3} S/cm se manteve, o que apresenta uma boa condutividade mesmo após a lavagem do substrato, frente à sua condutividade elétrica natural.



Fonte: O autor.

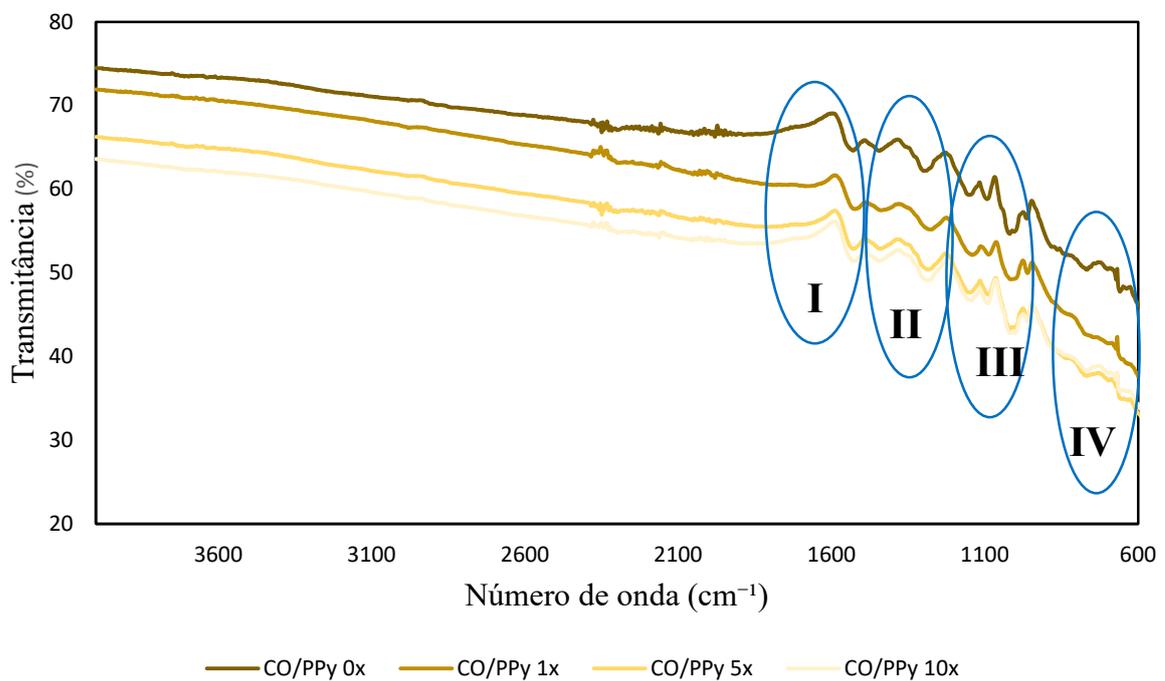
O resultado obtido após a lavagem está em divergência com resultados apresentados em Mendes (2019), isto porque no trabalho do autor houve um decaimento contínuo à medida que as amostras passavam por mais ciclos de lavagem, possivelmente pela diferença de natureza de fibra utilizada, como verificado em Babu et al. (2013) as fibras naturais apresentaram melhor interação em comparação com as fibras sintéticas. A queda de condutividade se apresentou

linear à medida que o substrato era lavado, apresentando valores após a primeira lavagem de $7,245 \text{ e}^{-5} \text{ S/cm}$ e para dez lavagens de $9,505 \text{ e}^{-8} \text{ S/cm}$.

4.2.4.1 Espectroscopia infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 18 pode-se observar o gráfico de FTIR das amostras funcionalizadas que passarão pelos processos de lavagem, como também a malha antes do processo de lavagem.

Figura 18 – FTIR das amostras funcionalizadas antes e após os ciclos de lavagem.



Fonte: O autor.

A partir da análise da Figura 18 pode-se observar que o comportamento das bandas características da malha polimerizada se manteve igual, mesmo após o processo de lavagem, não configurando nenhuma mudança química morfológica da malha funcionalizada. Não foi verificada na literatura nenhum trabalho que também realizasse análise de FTIR após a lavagem em substratos funcionalizados com polímero condutor. Na Tabela 8 é possível observar as bandas características do FTIR do PPy na malha de algodão.

Tabela 8 – Números de onda característicos do FTIR.

Número	Comprimento de onda (cm^{-1})	Descrição
I	1535 - 1446	Vibrações do anel de pirrol; Vibrações e estiramento de C=C e C-C

II	1299 - 1166	Vibrações de C-N
III	1041 - 901 - 784	Deformações de C-H; C=C em vibração de dobra plana do anel de pirrol; fora do plano da dobra em C-H.
IV	672	Corresponde ao íon dopado de Cl ⁻ na cadeia principal do Py.

Fonte: Adaptado de YALÇINKAYA, 2010; GRUNDEN, B.; IROH, J. O. 1995; MECERREYES et al., 2002.

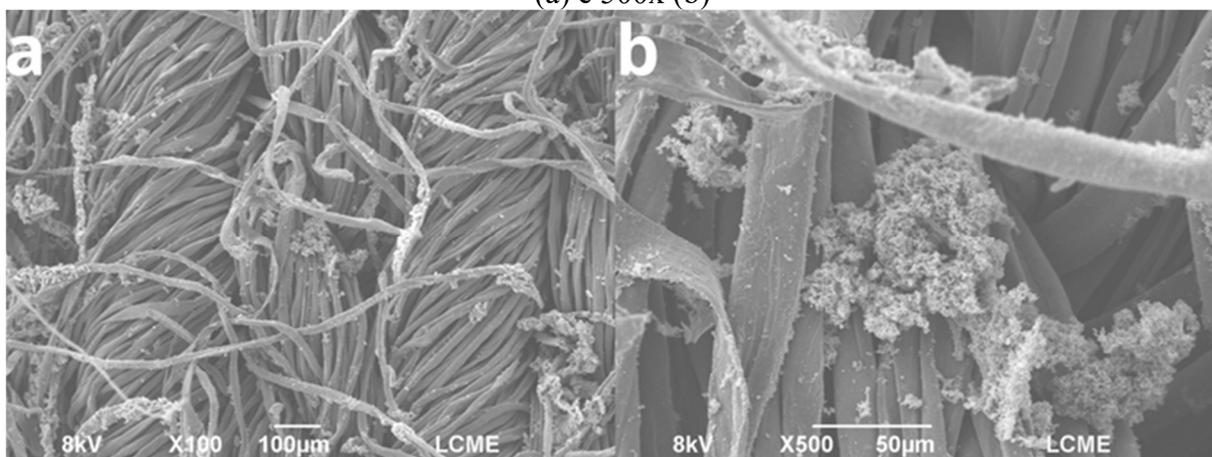
4.2.4.2 Microscopia eletrônica de varredura após lavagem.

Após a lavagem do substrato também foram realizadas análises de MEV para a visualização do polímero na malha. Nas Figuras 19, 20 e 21 pode-se verificar as microscopias referentes à malha funcionalizada e após 1 ciclo de lavagem, 5 ciclos e 10 ciclos, respectivamente.

A análise revela que as características particulares da fibra de algodão não se alteraram, apenas reduziu-se a quantidade de partículas de polímero presentes na estrutura a partir do aumento do número de ciclos de lavagens.

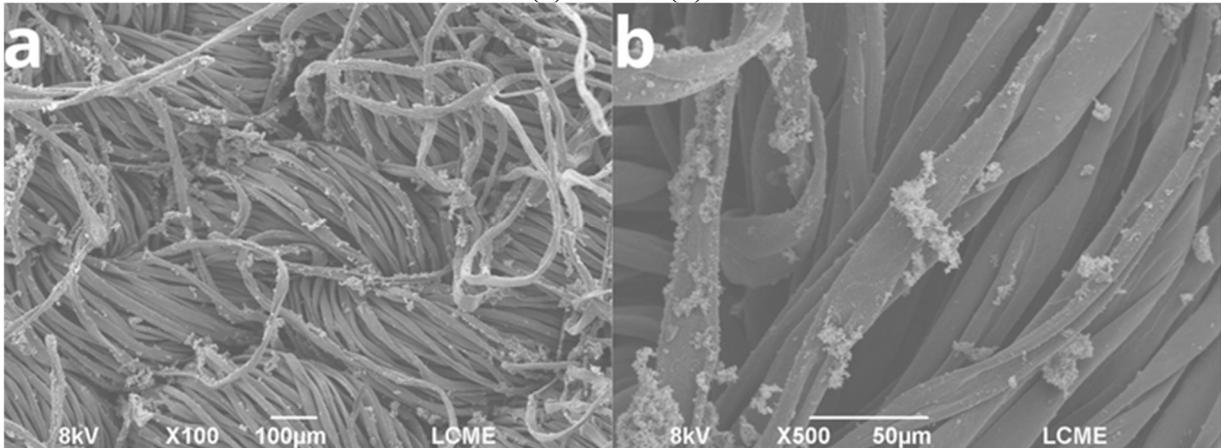
Ao analisar as imagens obtidas a partir do MEV, pode-se comparar com outros trabalhos da literatura que também apresentaram partículas do polímero sobre a superfície da fibra de algodão. (MENDES, 2019; MOHAMED et al., 2021). Em relação aos ciclos de lavagem, não foram realizadas imagens após eles na literatura.

Figura 19 – MEV da amostra polimerizada após 1 ciclo de lavagem com ampliação de 100x (a) e 500x (b)



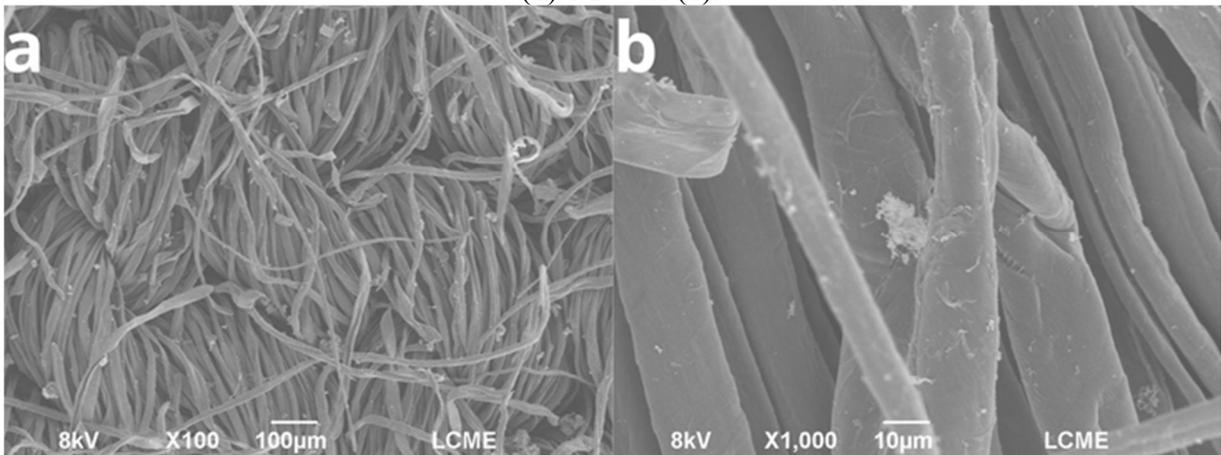
Fonte: O autor.

Figura 20 – MEV da amostra polimerizada após 5 ciclos de lavagem com ampliação de 100x (a) e 500x (b).



Fonte: O autor.

Figura 21 – MEV da amostra polimerizada após 10 ciclos de lavagem com ampliação de 100x (a) e 1000x (b).



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÃO

A partir deste trabalho de conclusão de curso pode-se verificar a importância e complexidade da caracterização, desenvolvimento e análise de um têxtil inteligente.

Com base nos objetivos específicos estipulados para este trabalho, os resultados alcançados são prósperos, atingindo valores de condutividade elétrica em 11 ordens de grandeza a mais que o substrato não funcionalizado. Considerando a técnica de polimerização *in situ* aplicada, obteve-se boa deposição de PPy na malha de CO.

Ao realizar a comparação dentre as concentrações de polimerização, à medida que se aumentou a concentração e o tempo de PPy, obteve-se um aumento na condutividade elétrica. Desta forma, a concentração de $\frac{1}{4}$ do padrão e 60 minutos se apresentou a mais condutiva.

Sobre as imagens de MEV, estas foram muito importantes para a visualização do polímero depositado sobre o substrato fibroso.

A realização do ensaio de tração pode demonstrar uma redução da força de ruptura da malha após a polimerização, concluindo que a funcionalização pode diminuir a resistência mecânica da malha. Porém há de ser realizados estudos futuros em relação à sua aplicabilidade em um produto em razão da perda de resistência bem como aos ciclos de lavagem realizados.

Verificou-se também a permanência do caráter condutivo das malhas funcionalizadas após os ciclos de lavagem, propriedade esta que se mantém interessante para a utilização de malhas no desenvolvimento de têxteis inteligentes. Os resultados se mostram promissores ao se utilizar têxteis a partir de malha condutora para o desenvolvimento de dispositivos vestíveis reutilizáveis e laváveis.

É prudente sinalizar que malhas por trama de algodão funcionalizadas com PPy demonstram potencial aplicação em dispositivos elétricos. Podendo expandir sua aplicação ao próprio vestuário, têxteis-lar, como também a dispositivos inteligentes complexos.

REFERÊNCIAS

- ALGODÃO PELO MUNDO #37/2023. **ABRAPA**, 2023. Disponível em: <<https://abrapa.com.br/2023/09/22/boletim-de-inteligencia-de-mercado-abrapa-com-as-principais-noticias-do-mundo-do-algodao-no-seu-whatsapp-4/>>. Acesso em 22 de set. de 2023.
- ABIDI, Nouredine; CABRALES, Luis; HAIGLER, Candace H. Changes in the cell wall and cellulose content of developing cotton fibers investigated by FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers*, [S.L.], v. 100, p. 9-16, jan. 2014. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.074>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- BARRA, G. M. DE O. Preparação e caracterização de polianilina e sua mistura com copolímeros de etileno-acetato de vinila. Tese de Doutorado. Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2001.
- BAIK, Kyungha et al. Integration of polypyrrole electrode into piezoelectric PVDF energy harvester with improved adhesion and over-oxidation resistance. **Polymers**, v. 11, n. 6, p. 1071, 2019.
- BENVENUTI, Eduardo Werner et al. Análise de eficiência na gestão de portfólio de tecidos de malha. 2021.
- BHADRA, S. et al. Progress in preparation, processing and applications of polyaniline. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, v. 34, n. 8, p. 783–810, 2009.
- BOSOWSKI, Patrycja et al. Classified Catalogue for Textile Based Sensors. **Advances in Science and Technology**, v. 80, p. 142-151, 2013.
- CAMARGO, F. R. DE. OBTENÇÃO DE TECIDO REVESTIDO COM POLIPIRROL E NANOTUBOS DE CARBONO PARA OBTENÇÃO DE TECIDO CONDUTOR. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Londrina, 2019.
- CALISKAN, Tugce et al. Design and development of textile-based strain sensors via screen printing. **Materials Today: Proceedings**, 2023.
- CHEN, Xiaodie et al. Preparing polypyrrole-coated stretchable textile via low-temperature interfacial polymerization for highly sensitive strain sensor. **Micromachines**, v. 10, n. 11, p. 788, 2019.
- CHERENACK, K.; VAN PIETERSON, L. Smart textiles: Challenges and opportunities. **Journal of Applied Physics**, v. 112, n. 9, 2012.
- CHOI, Mee-Sung; ASHDOWN, Susan P. Effect of changes in knit structure and density on the mechanical and hand properties of weft-knitted fabrics for outerwear. **Textile Research Journal**, v. 70, n. 12, p. 1033-1045, 2000.

DOU, Lu et al. Weft-Knitted Spacer Fabric for Highly Stretchable–Compressible Strain Sensor, Supercapacitor, and Joule Heater. **Nanomaterials**, v. 12, n. 20, p. 3684, 2022.

ELMOGAHZY, Y. E. Textile fabrics. In: Engineering Textiles. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 249– 274.

FAIRHURST, Catherine (Ed.). **Advances in apparel production**. Elsevier, 2008.

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.

GEHRKE, Inga et al. **Smart textiles production: Overview of materials, sensor and production technologies for industrial smart textiles**. DPI-Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019.

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

GRUNDEN, B.; IROH, J. O. Formation of graphite fibre-polypyrrole coatings by aqueous electrochemical polymerization. **Polymer**, v. 36, n. 3, p. 559-563, 1995.

HAMADEH, Lama; AL-HABAIBEH, Amin. Towards reliable smart textiles: Investigating thermal characterisation of embedded electronics in E-Textiles using infrared thermography and mathematical modelling. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 338, p. 113501, 2022.

HOUCK, Max M. Identification of textile fibers. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. 390 p. (Woodhead Publishing in Textiles).

JÚNIOR, Heitor Luiz Ornaghi et al. Smart fabric textiles: Recent advances and challenges. **Textiles**, v. 2, n. 4, p. 582-605, 2022.

KIM, Yun Ki; SHIN, Keun-Young. Dopamine-assisted chemical vapour deposition of polypyrrole on graphene for flexible supercapacitor. **Applied Surface Science**, v. 547, p. 149141, 2021.

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

KONGAHAGE, D.; FOROUGH, J. Actuator materials: Review on recent advances and future outlook for smart textiles. **Fibers**, v. 7, n. 3, 2019.

LENGOWSKI, Elaine Cristina. Caracterização e Predição da Cristalinidade de Celulose Através de Espectroscopia no Infravermelho e Análise Multivariada. 2012. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de

Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/34600>. Acesso em: 10 nov. 2023.

LI, Yuanyuan et al. Moisture-sensitive torsional cotton artificial muscle and textile. **Chinese Physics B**, v. 29, n. 4, p. 048103, 2020.

LIANG, Chunliu et al. High-performance cotton fabric-based supercapacitors consisting of polypyrrole/Ag/graphene oxide nanocomposite prepared via UV-induced polymerization. **Cellulose**, v. 29, n. 4, p. 2525-2537, 2022.

MAESTRI, Gabriela. **Efeito piezoelétrico em têxteis inteligentes utilizando malhas por trama**. 2022. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/234801>>. Acesso em: 08 ago. 2023.

MAESTRI, Gabriela et al. Development of a textile multilayered device with piezoelectric property using different knitted fabric structures. **Research Journal of Textile and Apparel**, 2023.

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

MAIA, D. J.; DE PAOLI, M. A.; ALVES, O. L.; ZARBIN, A. J. G.; NEVES, S. Revisão. Síntese de polímeros condutores em matrizes sólidas hospedeiras. **Química Nova**, São Paulo, v.23, n.2, p.204-215, 2000.

MECERREYES, D. et al. Synthesis and characterization of polypyrrole-graft-poly (ϵ -caprolactone) copolymers: new electrically conductive nanocomposites. **Synthetic metals**, v. 126, n. 2-3, p. 173-178, 2002.

MEDEIROS, E. S. OLIVEIRA, J. E.; CONSOLIN-FILHO, N.; PATERNO, L. G.; MATTOSO, L. H. C. Uso de polímeros condutores em sensores. Parte 1: Introdução aos polímeros condutores. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 7. n. 2, p. 62-77, 2012.

MEDEIROS, M.K. De. Medeiros, M. K. De. **Tecnologia têxtil**. Universidade Anhembi Morumbi, 1–22, 2016.

MEGANATHAN, Prathiba et al. Photocatalytic self-cleaning and antibacterial activity of cotton fabric coated with polyaniline/carbon nitride composite for smart textile application. **Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements**, v. 197, n. 3, p. 244-253, 2022.

MENDES, Bernardo Luís Moura. **Electronic textiles functionalized with conductive polymers**. 2019. Tese de Doutorado.

MERLINI, C. et al. A comparative study of aligned and random electrospun mats of thermoplastic polyurethane and conductive additives based on polypyrrole. *Polymer Testing*, v. 70, n. August, p. 486–497, 2018.

MERLINI, Claudia et al. Polypyrrole nanoparticles coated amorphous short silica fibers: Synthesis and characterization. *Polymer Testing*, v. 31, n. 8, p. 971-977, 2012.

MERLINI, Claudia et al. The effect of compressive stress on the electrical resistivity of poly (vinylidene fluoride)/polypyrrole blends. *Synthetic metals*, v. 196, p. 186-192, 2014.

MERLINI, Claudia; RAMÔA, Sílvia DAS; BARRA, Guilherme MO. Conducting polypyrrole-coated banana fiber composites: Preparation and characterization. *Polymer composites*, v. 34, n. 4, p. 537-543, 2013.

MOHAMED, Amina L.; EL-NAGGAR, Mehrez E.; HASSABO, Ahmed 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.

OUYANG, Jianyong. Application of intrinsically conducting polymers in flexible electronics. *SmartMat*, v. 2, n. 3, p. 263-285, 2021.

POPLI, S. A.; PATEL, U. D. Electrochemical decolourization of reactive black 5 in an undivided cell using ti and graphite anodes: Effect of polypyrrole coating on anodes. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, v. 5, n. 2, p. 145–156, 2015.

POWER, E. J. Sustainable developments in knitting. *International Journal of Business and Globalisation*, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2012.

RAMÔA, S. D. A. da S. Síntese, caracterização e avaliação da utilização de aditivo condutor nanoestruturado à base de montmorilonita/polipirrol em matriz de poliuretano termoplástico para aplicação em blindagem eletromagnética. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de PósGraduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis, 2015.

RAMOA, S. D. A. S. et al. Novel electrically conductive polyurethane/montmorillonitepolypyrrole nanocomposites. *Express Polymer Letters*, v. 9, n. 10, p. 945–958, 2015.

RAMÔA, S. D. A. da S. Síntese, caracterização e avaliação da utilização de aditivo condutor nanoestruturado à base de montmorilonita/polipirrol em matriz de poliuretano termoplástico para aplicação em blindagem eletromagnética. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de PósGraduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis, 2015.

- RASHEED, Abher. Classification of technical textiles. In: *Fibers for Technical Textiles*. Springer, Cham, 2020. p. 49-64.
- RAY, Sadhan C. (Ed.). **Fundamentals and advances in knitting technology**. CRC Press, 2012.
- SCHWARZ, A. et al. A roadmap on smart textiles. **Textile Progress**, v. 42, n. 2, p. 99–180, 2010.
- SITOTAW, Dereje Berihun et al. Tensile properties of single jersey and 1× 1 rib knitted fabrics made from 100% cotton and cotton/lycra yarns. **Journal of Engineering**, v. 2017, 2017.
- SYDUZZAMAN, M. et al. Smart Textiles and Nano-Technology: A General Overview. **Journal of Textile Science & Engineering**, v. 05, n. 01, 2015.
- SPENCER, David J. **Knitting technology: a comprehensive handbook and practical guide**. CRC press, 2001.
- VAGOTT, J.; PARACHURU, R. An Overview of Recent Developments in the Field of Wearable smart textiles. *Journal of Textile Science & Engineering*, v. 08, n. 04, 2018
- XIE, Juan et al. In situ polymerization of polypyrrole on cotton fabrics as flexible electrothermal materials. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, v. 14, p. 1558925019827447, 2019.
- YALÇINKAYA, Süleyman et al. Electrochemical synthesis and characterization of polypyrrole/chitosan composite on platinum electrode: its electrochemical and thermal behaviors. **Carbohydrate polymers**, v. 79, n. 4, p. 908-913, 2010.
- ZHANG, X.; MA, P. Application of Knitting Structure Textiles in Medical Areas. **Autex Research Journal**, v. 18, n. 2, p. 181–191, 2018.