

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

Camila Petters Gueths

**Desenvolvimento de têxteis condutores a partir de malha *spacer* por trama**

BLUMENAU

2023

Camila Petters Gueths

**Desenvolvimento de têxteis condutores a partir de malha *spacer* por trama**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Têxtil do Centro de Tecnológico de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Têxtil.

Orientador(a): Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Fernanda Steffens.

BLUMENAU

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gueths, Camila Petters

Desenvolvimento de têxteis condutores a partir de malha spacer por trama / Camila Petters Gueths ; orientadora, Fernanda Steffens, 2023.

64 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. Têxteis inteligentes. 3. Têxteis condutores. 4. Poliéster. 5. Condutividade elétrica. I. Steffens, Fernanda . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Têxtil. III. Título.

Camila Petters Gueths

## Desenvolvimento de têxteis condutores a partir de malha spacer por trama

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, 30 de novembro de 2023.



Documento assinado digitalmente

**Grazyella Cristina Oliveira de Aguiar**

Data: 05/12/2023 10:06:27-0300

CPF: \*\*\*.439.299-\*\*

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

Prof<sup>a</sup>. Grazyella Cristina Oliveira de Aguiar, Dr<sup>a</sup>.  
Coordenadora do Curso

### Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

**Fernanda Steffens**

Data: 05/12/2023 09:25:11-0300

CPF: \*\*\*.009.749-\*\*

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

Prof<sup>a</sup>. Fernanda Steffens, Dr<sup>a</sup>.  
Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

**Claudia Merlini**

Data: 05/12/2023 09:24:01-0300

CPF: \*\*\*.787.580-\*\*

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

Prof<sup>a</sup>. Claudia Merlini, Dr<sup>a</sup>.  
UFSC - EMT



Documento assinado digitalmente

**Jose Alexandre Borges Valle**

Data: 05/12/2023 09:18:43-0300

CPF: \*\*\*.292.909-\*\*

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

Prof. José Alexandre Borges Valle, Dr.  
UFSC - DET

Este trabalho é dedicado à minha família,  
que sempre me apoiou e incentivou.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Catarina e corpo docente do curso de Engenharia Têxtil pelo ensino de excelência.

À Deus pela vida e bençãos concedidas até aqui.

Ao meu marido, por fazer jus aos votos feitos em nosso casamento e estar ao meu lado nos dias desafiadores, amo você.

Aos meus pais Juliano e Márcia, obrigada por sempre me ensinarem os caminhos corretos e incentivarem o desenvolvimento da minha educação.

À minha irmã, Júlia, por ser minha melhor amiga.

Sem o apoio e amor de vocês quatro essa formação não seria possível!

À minha querida orientadora, Prof<sup>fa</sup>. Dra. Fernanda Steffens, por todo o auxílio, conhecimento compartilhado, incentivo e paciência na realização deste trabalho.

Às minhas amigas Ana Carolina e Bianca, por toda amizade desenvolvida ao longo deste curso, em cada trabalho e relatório, conversas e incentivos.

À Ana Laura, Pedro, Ludimilla e Nicole pelo apoio ao longo do meu percurso. E, agradeço a Bruna, ao Lucas, ao Henrique e ao Daniel, pela ajuda na realização dos testes para este trabalho.

A todos que contribuíram de alguma maneira, muito obrigada.

“Não devemos nos orgulhar de sermos melhores que os outros,  
mas sim melhores do que já fomos.” Bernardinho

## RESUMO

Têxteis condutores muitas vezes são pré-requisitos para o funcionamento de têxteis inteligentes. Neste contexto, o objetivo principal deste estudo foi desenvolver malhas condutoras através de malha *spacer* por trama fabricada em tear circular a partir da polimerização *in situ* de polipirrol em diferentes condições de tempo de polimerização e concentração de monômero. Utilizou-se as seguintes condições experimentais de 0,050 mol/L em 60 min, 0,033 mol/L em 30 min, 0,025 mol/L em 60 min e 0,050 mol/L em 30 min. Através do FTIR determinou-se a composição dos filamentos que constroem o substrato utilizado, verificando que se trata de poliéster. Ainda, constatou-se que a melhor condição experimental foi a que se empregou uma concentração de 0,05 mol/L de monômero de pirrol e 30 min de polimerização, apresentando uma condutividade elétrica igual a  $4,39 \times 10^{-4} \text{ S.cm}^{-1}$ . O ensaio de resistência à tração demonstrou que a amostra polimerizada possui propriedades mecânicas superiores a amostra antes da polimerização na direção das colunas. A análise do MEV demonstrou que conforme houve a diminuição da concentração de Py ocorreu uma redução significativa na quantidade de PPy aderido à superfície da fibra de poliéster, que formam aglomerados porosos. Por meio de uma segunda análise de FTIR constatou-se que houve surgimento de picos específicos característicos do polipirrol na superfície das malhas polimerizadas. A avaliação da condutividade após lavagem revelou que ocorre sua diminuição linear com o aumento da quantidade de lavagens. Os valores de condutividade obtidas para o processo de lavagem em 1x, 5x e 10x, são  $1,23 \times 10^{-5} \text{ S.cm}^{-1}$ ,  $4,54 \times 10^{-6} \text{ S.cm}^{-1}$  e  $2,86 \times 10^{-6} \text{ S.cm}^{-1}$ , respectivamente. Esses resultados demonstram que a utilização de um substrato como a malha *spacer* para o desenvolvimento de têxteis condutores é promissor.

**Palavras-chave:** Poliéster. Condutividade elétrica. Têxteis inteligentes.

## ABSTRACT

Conductive textiles are often prerequisites for the operation of smart textiles. In this context, the main objective of this study was to develop conductive knitted fabric using weft knitted spacer manufactured on a circular knitting machine based on the in-situ polymerization of polypyrrole under different conditions of time of polymerization and monomer concentration. The experimental conditions of 0,050 mol/L – 60 min, 0,033 mol/L – 30 min, 0,025 mol/L – 60 min and 0,050 mol/L – 30 min were used. Using FTIR, the composition of the filaments that constitute the substrate used was determined, indicating that they are polyester. It was also found that the best experimental condition was the one using a concentration of 0,05 mol/L of pyrrole monomer and 30 min of polymerization, with an electrical conductivity equal to  $4,39 \times 10^{-4} \text{ S.cm}^{-1}$ . The tensile strength test demonstrated that the polymerized sample presented superior mechanical characteristics to the sample before polymerization in the wales' direction. SEM analysis revealed that as the concentration of Py decreased, there was a significant reduction in the amount of PPy adhered to the surface of the polyester fiber, forming porous agglomerates. A second FTIR analysis indicated the appearance of specific peaks characteristic of polypyrrole on the surface of the polymerized knitted fabrics. The evaluation of conductivity after washing revealed that there is a linear decrease in conductivity as the number of washes increases. The conductivity values obtained for the 1x, 5x and 10x washing process are  $1,23 \times 10^{-5} \text{ S.cm}^{-1}$ ,  $4,54 \times 10^{-6} \text{ S.cm}^{-1}$  and  $2,86 \times 10^{-6} \text{ S.cm}^{-1}$ , respectively. These results show that the use of a substrate such as spacer fabric for the development of conductive textiles is promising.

**Keywords:** Polyester; Electric conductivity; Smart textiles.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de a) tecido plano, b) malha, c) não-tecido. ....	22
Figura 2 – Exemplo de malha spacer .....	25
Figura 3 – Classificação dos têxteis inteligentes. ....	26
Figura 4 – Faixa de condutividade de polímeros em comparação com a condutividade de outros materiais. ....	28
Figura 5 – Estrutura química pirrol (esquerda) e polipirrol (direita). ....	29
Figura 6 – Mecanismo da polimerização química oxidativa do polipirrol. ....	30
Figura 7 – Metodologia experimental. ....	35
Figura 8 – a) Maillimiter; b) Paquímetro digital. ....	37
Figura 9 – Esquema ilustrativo do processo de polimerização oxidativa in situ do pirrol nas amostras de malha spacer. ....	39
Figura 10 – Processo de polimerização in situ nas amostras de malha. ....	40
Figura 11 – Equipamentos utilizados para determinação da condutividade elétrica pelo método de 4 pontas. ....	41
Figura 12 – Amostra de malha spacer. ....	44
Figura 13 – Microscopia da a) Camada 1 b) Camada 2 e sessão transversal da malha spacer na direção c) das colunas e d) das carreiras. ....	45
Figura 14 – Raporte malha spacer. ....	45
Figura 15 – Filamentos presentes na malha. ....	45
Figura 16 – Unidade de repetição do poliéster. ....	48
Figura 17 – FTIR dos filamentos presentes na malha spacer. ....	49
Figura 18 – Amostras de malha spacer após funcionalização. ....	50
Figura 19 – Micrografias da superfície das amostras a) antes da funcionalização; após funcionalização nas condições b) 0,050 mol/L – 60 min, c) 0,033 mol/L – 60 min, d) 0,025 mol/L – 60 min, e) 0,050 mol/L – 30 min, com aumento de 500x. ....	52
Figura 20 – Micrografias dos fios de ligação a) antes da funcionalização; e após funcionalização nas condições b) 0,050 mol/L – 60 min, c) 0,033 mol/L – 60 min, d) 0,025 mol/L – 60 min, e) 0,050 mol/L – 30 min, com aumento de 2000x. ....	53
Figura 21 – FTIR amostra após funcionalização. ....	54
Figura 22 – Diagrama de tensão x deformação na direção das colunas. ....	55
Figura 23 – Gráfico de condutividade elétrica após lavagem. ....	56

Figura 24 – Micrografias das amostras a) antes da lavagem, b) após 1x c) após 5x e d) após 10x, com aumento de 100x. ....58

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais diferenças entre malharia por trama e por urdume.....	22
Quadro 2 – Estudos no Google Scholar por palavra-chave e período.....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Obtenção das malhas condutoras. ....	38
Tabela 2 – Títulos médios. ....	46
Tabela 3 – Gramatura malha spacer. ....	46
Tabela 4 – Comprimento da laçada. ....	47
Tabela 5 – Quantidade carreiras/cm e cursos/cm. ....	47
Tabela 6 – Espessura malha spacer. ....	47
Tabela 7 – Espessura malha spacer antes e após funcionalização. ....	50
Tabela 8 – Condutividade elétrica das amostras após funcionalização. ....	51
Tabela 9 – Perda de massa após lavagem. ....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATR	Refletância Total Atenuada
EDOT	3,4-etilenodioxítiofeno
FeCl <sub>3</sub>	Cloreto férrico
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
ISO	Organização Internacional para Padronização
LABTEC	Laboratório de Tecidos e Malhas
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
LEM	Laboratório de Ensaios Mecânicos
LTES	Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia
LTMA	Laboratório de Transformações e Materiais Avançados
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PANI	Polianilina
PECs	Polímeros Extrinsicamente Condutores
PEDOT	Poli(3,4-etilenodioxítiofeno)
PICs	Polímeros Intrinsecamente Condutores
POLICOM	Laboratório de Pesquisa em Polímeros e Compósitos
PPy	Polipirrol
Py	Pirrol
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UV	Ultravioleta

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$  condutividade elétrica

$\rho$  resistividade elétrica

$\Omega$  ohm

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	OBJETIVOS .....	19
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>19</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
2.1	TECNOLOGIAS TÊXTEIS.....	21
2.1.1	<b>Tecnologia de Malharia</b> .....	<b>22</b>
2.2	ESTRUTURAS <i>SPACER</i> .....	23
2.3	TÊXTEIS INTELIGENTES.....	25
2.3.1	<b>Têxteis Condutores</b> .....	<b>27</b>
2.4	POLÍMEROS INTRINSICAMENTE CONDUTORES.....	27
2.4.1	<b>Polipirrol</b> .....	<b>29</b>
2.4.1.1	<i>Funcionalização de substratos têxteis com polipirrol</i> .....	31
2.5	PANORAMA CIENTÍFICO.....	32
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>35</b>
3.1	MATERIAIS .....	36
3.2	MÉTODOS .....	36
3.2.1	<b>Caracterização da malha <i>spacer</i></b> .....	<b>36</b>
3.2.1.1	<i>Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)</i> .....	36
3.2.1.2	<i>Determinação do raporte, gramatura, densidade, comprimento da laçada, espessura e título dos fios</i> .....	37
3.2.2	<b>Obtenção da malha <i>spacer</i> revestida com polipirrol</b> .....	<b>38</b>
3.2.3	<b>Caracterização da malha <i>spacer</i> funcionalizada</b> .....	<b>40</b>
3.2.3.1	<i>Condutividade elétrica pelo método de 4 pontas</i> .....	40
3.2.3.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i> .....	42

3.2.3.3	<i>Resistencia à tração</i> .....	42
3.2.4	<b>Resistência à lavagem</b> .....	<b>42</b>
4	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>44</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA <i>SPACER</i> .....	44
4.1.1	<b>FTIR dos filamentos da malha <i>spacer</i></b> .....	<b>48</b>
4.2	POLIMERIZAÇÃO <i>IN SITU</i> DO PIRROL NAS AMOSTRAS DE MALHA ...	49
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA MALHA <i>SPACER</i> FUNCIONALIZADA .....	50
4.3.1	<b>Condutividade elétrica</b> .....	<b>50</b>
4.3.2	<b>Microscopia eletrônica de varredura das condições experimentais ...</b>	<b>52</b>
4.3.3	<b>FTIR após funcionalização</b> .....	<b>54</b>
4.3.4	<b>Resistência à tração</b> .....	<b>54</b>
4.4	CONDUTIVIDADE APÓS LAVAGEM.....	56
5	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>59</b>
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Economicamente, percebe-se que a dimensão do mercado dos têxteis inteligentes está em ascensão no mundo todo, ultrapassando a marca de USD 5,55 bilhões até 2025 (Stylios, 2020). Dessa forma, é notório que os têxteis inteligentes se diferenciam dos artefatos têxteis convencionais pois possuem a capacidade de alterar suas propriedades a partir de um estímulo externo sendo um campo de estudo vasto ocupando diversas áreas como saúde, transportes, segurança, construção civil e arquitetura (Maestri, 2022).

Como exemplos de têxteis inteligentes observa-se a incorporação de fibras óticas em substratos fibrosos, bem como a funcionalização de materiais com agentes crômicos (hidrocrômicos, fotocrômicos, termocrômicos, etc), materiais com memória de forma, materiais com mudança de fase, luminescentes, fotovoltaicos, termoreguladores e, por fim, mas de igual importância, com os materiais condutores (Gauche *et al.*, 2020).

Ademais, relativamente aos têxteis condutores, são geralmente fabricados pelo pós-tratamento do tecido ou pela adição de cargas condutoras à fibra na etapa de fiação. Em particular, o pós-tratamento, como a polimerização *in situ* de polímeros intrinsecamente condutores, tem sido utilizado principalmente porque é fácil de aplicar no processo de acabamento do tecido. E, entre os diferentes polímeros intrinsecamente condutores, o polipirrol possui excelente estabilidade ambiental, fácil síntese e condutividade mais elevada do que outros polímeros condutores (Oh; Park; Kim, 2003).

Por intermédio dos têxteis condutores, percebeu-se uma ascensão dos têxteis eletrônicos (e-têxteis), promovendo uma nova era de *wearables* têxteis que podem armazenar e absorver energia, sensorizar, exibir diferentes padrões gráficos, monitorar e calcular informações. Estas características emergentes tornam-os atraentes para aplicações em produtos *healthcare*, artigos esportivos e monitorização ambiental, entre muitos outros, onde as propriedades de dispositivos no formato de vestuário ou têxtil são preferidos, se não forem necessários (Shi *et al.*, 2023).

Referindo-se especificamente às estruturas têxteis, os materiais provenientes da tecnologia de malharia por trama podem estar presentes em diversos segmentos

técnicos assim como na produção de têxteis inteligentes (Maestri, 2022). Com esta tecnologia é possível o desenvolvimento de estruturas *spacer*, que são materiais têxteis formados por duas camadas de tecido ou malha, unidas por um conjunto de fios de ligação. Tal estrutura apresenta características diferenciadas como excelente elasticidade, resistência à compressão, resistência ao impacto, *ecofriendly*, além de proporcionar boa respirabilidade e permeabilidade à umidade (Lin *et al.*, 2023).

Além disso, não se encontra na literatura trabalhos focados na avaliação da condutividade elétrica utilizando malhas desenvolvidas a partir da tecnologia de malharia por trama em tear circular duplafrentura obtendo-se uma malha *spacer*. Sendo que, outro parâmetro para análise pode ser a variação na concentração do monômero de pirrol para proporcionar a condução elétrica nos substratos supracitados.

Dessa forma, encontra-se uma oportunidade para estudar a influência de diferentes parâmetros sobre a condutividade através de uma diferente estrutura têxtil. Com isso, o presente estudo tem por principal objetivo desenvolver e analisar, comparativamente, diferentes condições de funcionalização através da polimerização *in situ* de polipirrol em uma malha *spacer* por trama, capaz de aumentar a condutividade elétrica do substrato.

## 1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos gerais e específicos para a execução deste projeto final de curso.

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente estudo é desenvolver malhas condutoras através de malha *spacer* por trama a partir da polimerização *in situ* de polipirrol.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) analisar a influência na condutividade elétrica das amostras de malha *spacer* revestidas com diferentes concentrações de polipirrol e tempos de polimerização;

- b) compreender as propriedades mecânicas sob tração das malhas após a polimerização;
- c) avaliar as características morfológicas das malhas condutoras desenvolvidas;
- d) verificar a solidez a lavagem quanto a condutividade elétrica dos revestimentos de polipirrol nas malhas condutoras.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão apresentados os conceitos da fundamentação teórica utilizados para obter a compreensão do tema abordado neste estudo. Inicia-se com uma apresentação das tecnologias têxteis, passando para as estruturas *spacers*. Após adentra-se nos têxteis inteligentes, focando nos têxteis condutores, e finalizando com os polímeros intrinsecamente condutores.

### 2.1 TECNOLOGIAS TÊXTEIS

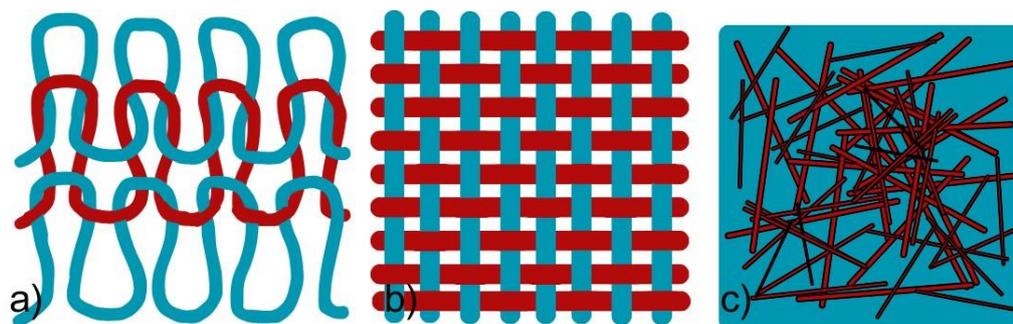
Uma estrutura têxtil pode ser construída através de diversas tecnologias, sendo algumas delas a tecelagem, a malharia e os não tecidos. Além disso, segundo Ray (2012) um tecido é definido como uma estrutura bidimensional (2D) ou tridimensional (3D) manufaturada a partir de materiais têxteis, como fibra, fio, filamento ou sua combinação, com propriedades de resistência mecânica, alongamento, flexibilidade razoáveis, utilizado para diversas aplicações, principalmente em vestuário.

Na tecelagem, os tecidos planos são formados a partir de um entrelaçamento perpendicular entre os fios de trama e urdume, conforme ilustrado na Figura 1a. Ademais, é considerado o método mais antigo e elementar de produzir comprimentos contínuos de tecido (Spencer, 2001).

Já a malharia refere-se a tecnologia utilizada para obtenção de malhas através da utilização de agulhas que formam laçadas a partir de um ou mais fios (Figura 1b). Divide-se em dois grupos: malharia por trama e malharia por urdume. Esta classificação é baseada na direção do movimento do fio em relação à direção de formação da malha (Ray, 2012).

Em relação aos não tecidos são obtidos a partir de fibras ou filamentos dispostos aleatoriamente ou não, formando uma manta que pode ser consolidada por métodos mecânicos, químicos ou térmicos (Russell, 2007). A Figura 1c ilustra um exemplo de não tecido.

Figura 1 – Exemplo de a) tecido plano, b) malha, c) não-tecido.



Fonte: Autora (2023).

### 2.1.1 Tecnologia de Malharia

A tecnologia de malharia requer fibras relativamente finas, resistentes mecanicamente e com boas propriedades de elasticidade (Spencer, 2001). Dessa forma, se os fios na forma de laçadas são formados e depositados na direção da largura ou transversal, então o processo de malharia é chamado de malharia por trama. Caso os fios sejam formados na direção do comprimento, o processo é denominado de malharia por urdume (Ray, 2012). Outros fatores geram diferenças entre as duas tecnologias, e são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais diferenças entre malharia por trama e por urdume.

<b>Por trama</b>	<b>Por urdume</b>
A formação da laçada ocorre na direção horizontal	A formação da laçada ocorre na direção vertical
As agulhas formam laçadas sequencialmente	As agulhas formam laçadas simultaneamente
Alimentação dos fios proveniente de cones em gaiolas	Alimentação dos fios proveniente de carretéis
Menos processos preparatórios são necessários	Mais processos preparatórios são necessários

<b>Por trama</b>	<b>Por urdume</b>
A estabilidade dimensional das malhas é menor	A estabilidade dimensional das malhas é maior
Teares retilíneos e circulares (monofrontura e duplafrontura)	Teares retilíneos (Ketten e Raschel)
Os teares, bem como as malhas produzidas, são mais baratos	Os teares, bem como as malhas produzidas, são mais caros
Possibilidade de desmalhar/desconstruir	Impossibilidade de desmalhar/desconstruir

Fonte: Adaptado de Ferreira *et al.* (2022).

## 2.2 ESTRUTURAS SPACER

Em relação as estruturas *spacer*, consistem em duas camadas superficiais (superior e inferior) conectadas a partir de fios de ligação dispostos perpendicularmente, geralmente monofilamento. Podem ser produzidas tanto por processos de malharia quanto de tecelagem, entre os quais os métodos de malharia são mais comumente usados (Lin *et al.*, 2023).

Graças à estrutura única de três camadas, as estruturas *spacer* geralmente mostram superioridade em relação a uma estrutura mais estável, bem como elevada respirabilidade e excelente resistência à compressão (Yip; Ng, 2007). De acordo com Lin *et al.* (2023), malhas *spacer* apresentam excelente elasticidade, resistência à compressão, resistência ao impacto e respeito ao meio ambiente uma vez que esse tipo de estrutura, também denominada de “sanduíche”, proporciona boa respirabilidade e permeabilidade à umidade, o que é muito adequado para a aplicação de dispositivos de armazenamento de energia vestíveis.

Ainda, segundo Horrocks e Anand (2016) uma das maiores vantagens do uso de estruturas *spacers* é a substituição do neoprene, e outras espumas que são empregadas em tecidos para criação volume, suavidade, flexibilidade e resiliência. Uma vez que essas espumas normalmente são desconfortáveis, e produzidas a partir de matérias inflamáveis, que dificultam o processo de reciclagem desses

substratos, gerando gases tóxicos. Além disso, a malha *spacer* pode ser muito permeável ao ar. Assim, as estruturas *spacer* são comumente usadas para substituir materiais de espuma em assentos de automóveis, roupas de cama e acolchoamentos de proteção (Yu *et al.*, 2022).

Existem dois tipos de malha *spacer*: por urdume e por trama. O primeiro tipo é formado em tear Raschel constituído de duas barras de agulha, enquanto o segundo é desenvolvido em um tear circular ou retilíneo, ambos com duplafrontura (Yip; Ng, 2007).

Acerca das malhas *spacer* por urdume, tipicamente, estes tecidos espaçadores podem ter uma espessura que varia entre 1 e 65 mm, sendo que as duas faces apresentam uma espessura de 0,4 a 1 mm. E em relação as malhas *spacer* por trama, quando produzidos em tear de malharia circular, a estrutura básica do tecido sanduíche é limitada a tricotar os fios de ligação no disco e prendê-los no cilindro, ou armazenar os fios de ligamento no disco e nas agulhas do cilindro. Além disso, na malharia por trama, a espessura do *spacer* é normalmente limitada entre 2 e 10 mm (Soin *et al.*, 2014).

Segundo Benvenuti *et al.* (2021) os principais fabricantes de teares de malharia por trama, como Fukuhara, Terrot e Mayer & Cie têm em seu portfólio de produtos pelo menos um modelo voltado ao desenvolvimento de têxteis técnicos como as malhas *spacer*.

Quanto a aplicação das malhas *spacers*, pode-se afirmar que são amplamente utilizadas em diferentes produtos, como no segmento automobilístico (capas de assento de carro, tampa do painel), aplicações industriais (compósitos), médico (cobertores anti-escaras), esportivos e até mesmo em vestuário convencional, como bojos de sutiã, almofadas para roupas de banho, entre outros (Yip; Ng, 2007; Soin *et al.*, 2014). Na Figura 2 visualiza-se um exemplo de estrutura *spacer*.

Figura 2 – Exemplo de malha *spacer*



Fonte: Autora (2023).

A malha *spacer* como material componente de vestuário pode ser altamente respirável (a depender do raporte utilizado nas superfícies externas), criando assim um ambiente livre de umidade, o que, por sua vez reduz as chances de maceração da pele. Isso leva a um maior nível de conforto quando comparado a materiais como espuma, neoprene e tecidos laminados (Yip; Ng, 2007).

### 2.3 TÊXTEIS INTELIGENTES

Os têxteis inteligentes (do inglês *smart textiles*) são derivados do conceito de materiais inteligentes ou *smart materials*. O termo foi pela primeira vez apresentado no Japão, em 1989. Cronologicamente, as descobertas de materiais com memória de forma datam dos anos 60 e de materiais como géis poliméricos da década de 70. No entanto, foi apenas no final dos anos 90 que os materiais inteligentes foram introduzidos no setor têxtil (Ferreira; Ferreira; Oliveira, 2014).

Os têxteis inteligentes surgiram para recriar a interação do utilizador com a roupa. São substratos que respondem a estímulos, seja variando luz, toque, temperatura, umidade; e quando não exposto a fatores externos, comporta-se normalmente, sem apresentar alterações. A resposta ao estímulo é dada por mudanças nas propriedades físicas, mecânicas, químicas, magnéticas, elétricas ou térmicas do material, sendo vista, por exemplo, através da mudança da cor, forma, volume, viscosidade, entre outros (Gauche *et al.*, 2020).

Ainda, os têxteis inteligentes podem ser classificados em três categorias, sendo eles: passivos, ativos e muito inteligentes. Os passivos apresentam

características funcionais que não dependem de mudanças no ambiente, ou seja, sua propriedade inteligente está presente no material têxtil mesmo sem uma ação externa, como por exemplo, um substrato fibroso com característica inteligente de proteção ultravioleta (UV), que possui a funcionalidade mesmo sem a presença de raios UV. Os têxteis inteligentes ativos são capazes de sentir e responder a um estímulo oriundo do ambiente, principalmente utilizados como sensores e atuadores (sensores tácteis). A terceira categoria contempla os têxteis muito inteligentes, que são capazes de detectar mudanças externas, reagir a estas, e ainda se adaptar às condições desejadas (Maestri, 2022). A Figura 3 ilustra essa forma de classificação.

Figura 3 – Classificação dos têxteis inteligentes.



Fonte: Maestri (2022).

Dentro do segmento dos têxteis inteligentes, ainda se destacam os têxteis eletrônicos ou *e-textiles*, que surgiram no final da década de 1990, a partir de uniformes utilizando fibra ótica integrada para monitoração de soldados, uso de eletrodos têxteis para monitorar a atividade cardiopulmonar e uso de tecidos termo e piezoresistivos para medição de variações térmicas e parâmetros biomecânicos (Ferreira; Ferreira; Oliveira, 2014). Sendo que os elementos chave para a criação de e-têxteis são o uso de fibras ou fios eletricamente condutores nos quais os sinais podem ser enviados por toda a peça de vestuário e outros segmentos flexíveis,

como sensores, atuadores ou *chips* de computador que são incorporados nas peças de vestuário (Honarvar; Latifi, 2016).

Ainda segundo Sankauskaite *et al.* (2023) os têxteis eletrônicos apresentam um grande potencial para utilização nas áreas da proteção e defesa pessoal, construção de automóveis, aeroespacial, marítima, proteção ambiental e agricultura.

### 2.3.1 Têxteis Condutores

O termo “têxteis eletricamente condutores” é usado para uma ampla gama de produtos à base de fibras têxteis com diferentes valores de condutividade elétrica (superficial) específica. Têxteis eletricamente condutores incluem fibras condutoras, fios, tecidos e produtos manufaturados a partir deles. Muitas vezes são pré-requisitos para o funcionamento de têxteis inteligentes. Sua qualidade, ou seja, a permanência do agente condutor no substrato fibroso, determina a durabilidade, lavabilidade, reutilização e desempenho fibroso de têxteis inteligentes (Grancarić *et al.*, 2017).

Existem diversas abordagens para a obtenção de têxteis condutores. Um dos métodos consiste em incorporar partículas condutoras, como partículas metálicas e nanotubos de carbono durante o processo de extrusão e formação do fio. Elementos condutores também podem ser incorporados diretamente em um tecido. Cabe ressaltar que a utilização de metal nos fios pode danificar a sua estrutura, podendo o metal fraturar e se deteriorar com o tempo. Outras desvantagens estão relacionadas a baixa flexibilidade e a incompatibilidade com meios úmidos, que podem prejudicar o conforto, mobilidade e o tempo de vida do artigo têxtil (Bierhalz *et al.*, 2022).

Sendo assim, o revestimento de substratos têxteis com polímeros intrinsecamente condutores surge como uma alternativa aos fios metálicos.

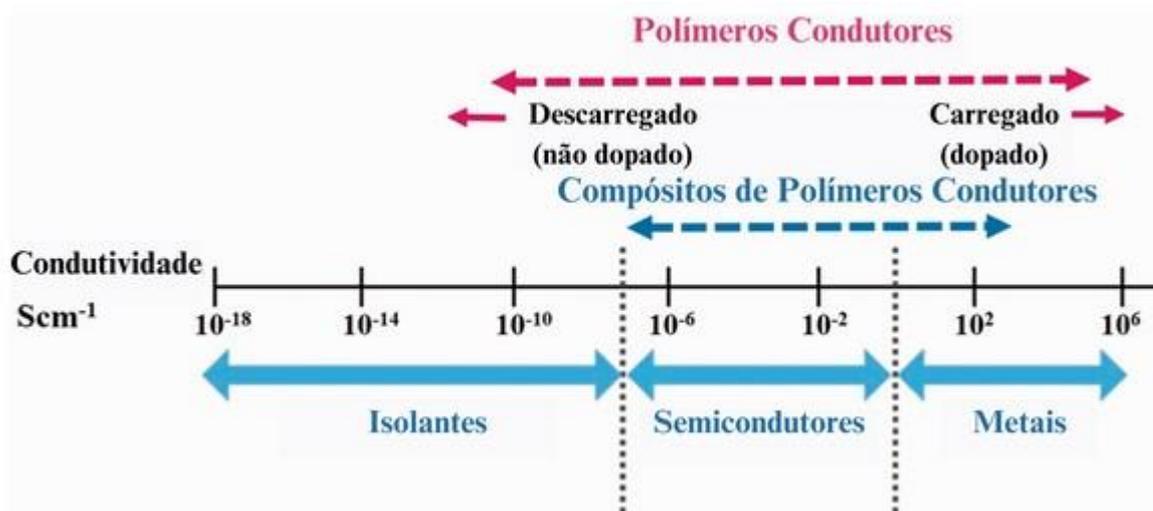
## 2.4 POLÍMEROS INTRINSICAMENTE CONDUTORES

A condutividade elétrica de um material está relacionada com a quantidade de elétrons livres que ele pode apresentar, dessa forma, quanto mais elétrons livres, maior a sua capacidade de conduzir corrente elétrica. Ainda, os polímeros são conhecidos por suas propriedades como leveza, flexibilidade e por serem isolantes.

Isto pois, a maioria dos materiais poliméricos não são eficientes na condução de eletricidade, uma vez que não possuem uma quantidade de elétrons livres satisfatória para serem compartilhados no processo de condução (Lima *et al.*, 2018).

Com isso, os polímeros condutores vêm sendo estudados, devido a sua capacidade de condução elétrica. A condutividade dos polímeros condutores está na faixa de condução dos semicondutores. A razão para a forte utilização destes polímeros é o seu grande potencial para novas aplicações. A condutividade dos polímeros condutores comparada com a de outros materiais pode ser visualizada na Figura 4. Eles conduzem cargas elétricas e apresentam ótimas propriedades elétricas. Existem dois subgrupos de polímeros condutores: os polímeros extrinsecamente condutores, também conhecidos como compósitos condutores e os polímeros intrinsecamente condutores (Grancarić *et al.*, 2017).

Figura 4 – Faixa de condutividade de polímeros em comparação com a condutividade de outros materiais.



Fonte: Adaptado de Grancarić *et al.* (2017).

Sobre o primeiro grupo, os polímeros extrinsecamente condutores (PECs) são obtidos pela mistura por fusão de uma matriz polimérica isolante, termoplástica ou termofixa, com cargas condutoras. Já o segundo grupo, os polímeros intrinsecamente condutores (PICs) são polímeros sintéticos com capacidade de conduzir elétrons (Grancarić *et al.*, 2017).

Dessa forma, a capacidade de condução elétrica dos polímeros condutores intrínsecos se deve a dois fatores. O primeiro é a sua estrutura constituída por

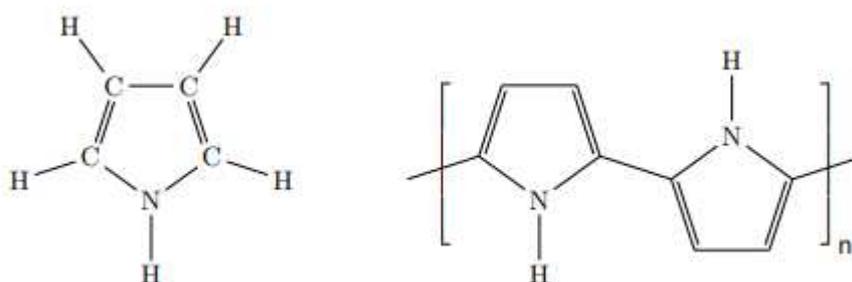
ligações simples e duplas alternadas (sistema conjugado). O outro fator é o processo chamado de dopagem onde removem-se elétrons (oxidação) ou insere-os (redução) na cadeia polimérica. Dessa forma, os elétrons presentes nas duplas ligações (C=C) precisam ser retirados ou adicionados por meio da dopagem e a condução ocorre por conta da movimentação dos elétrons e/ou vacâncias (Maestri, 2022).

Os polímeros condutores estão presentes em uma ampla variedade de áreas, como diodos emissores de luz, músculos artificiais, sensores e dispositivos de armazenamento de energia. Os polímeros condutores mais comumente estudados incluem polianilina (PANI), polipirrol (PPy) e poli(3,4-etilenodioxitiofeno) (PEDOT), que têm sido amplamente explorados em supercapacitores derivados de tecnologia vestível através da oxidação eletroquímica nos têxteis (Wen *et al.*, 2021).

### 2.4.1 Polipirrol

Um dos polímeros bastante estudados no campo dos têxteis condutores é o polipirrol, visto à sua elevada condutividade elétrica, estabilidade térmica, flexibilidade e fácil síntese (Merlini *et al.*, 2012). Além disso, o polipirrol pode alcançar uma ampla gama de valores de condutividade elétrica por meio de variações nas condições de síntese. Ele pode ser preparado a partir da síntese eletroquímica do pirrol (Py) ou com o uso de agentes oxidantes na presença ou não de surfactantes apropriados (Contri, 2015). Sua estrutura e a de seu monômero podem ser visualizadas na Figura 5.

Figura 5 – Estrutura química pirrol (esquerda) e polipirrol (direita).

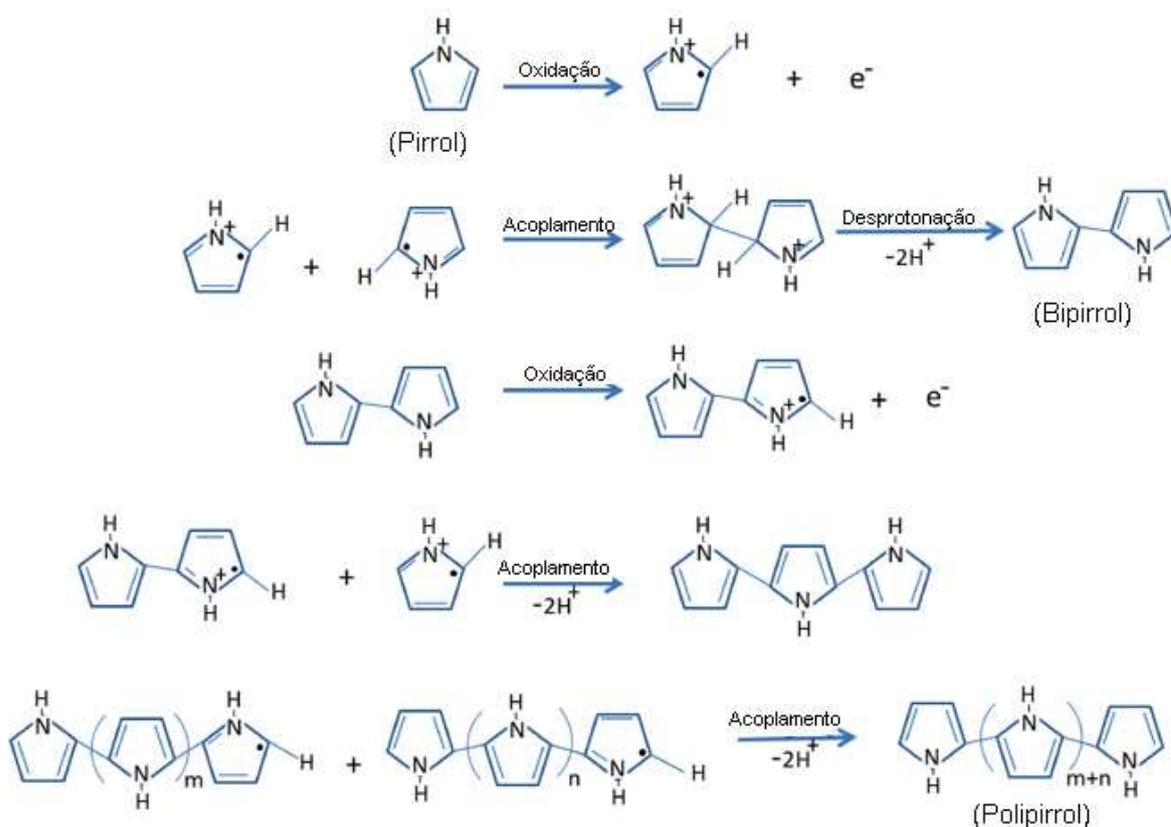


Fonte: Strohmeier *et al.* (2020).

A polimerização química oxidativa é um método fácil e rápido para a síntese de PPy em grandes quantidades. Este método pode ser realizado numa solução contendo monômeros, oxidantes (como  $\text{FeCl}_3$ ) e dopante. A solução pode ser aquosa ou orgânica, como álcool, benzeno, clorofórmio e acetonitrila. Além disso, muitos estudos afirmam que as propriedades do PPy sintetizado quimicamente dependem da natureza do solvente, da concentração e da natureza do agente oxidante, da temperatura e do tempo de polimerização (Choudhary; Ansari; Purty, 2020).

O mecanismo para a polimerização química oxidativa ocorre conforme pode ser visualizado na Figura 6. Sendo que primeiramente os monômeros de pirrol são oxidados para formar um cátion radical. Posteriormente, dois cátions se acoplam e depois são desprotonados para formar o biperirrol. Seguindo etapas semelhantes, os biperirróis são oxidados, acoplados e desprotonados para formar oligômeros e, finalmente, o polímero de PPy (Choudhary; Ansari; Purty, 2020).

Figura 6 – Mecanismo da polimerização química oxidativa do polipirrol.



Fonte: Adaptado de Choudhary, Ansari e Purty (2020).

#### 2.4.1.1 Funcionalização de substratos têxteis com polipirrol

Um exemplo de funcionalização de substrato têxtil com polipirrol é o trabalho de Oh, Park e Kim (2003), no qual foram avaliadas as mudanças na condutividade do tecido plano de sarja (95 % náilon e 5 % elastano) frente a tensão de tração. Este parâmetro foi investigado para melhorar as propriedades do material condutor da almofada do eletrodo usado para eletroterapia, visto que o material é submetido a vários movimentos do corpo humano. Para isso, o polipirrol foi polimerizado quimicamente *in situ*. Os resultados demonstraram que a condutividade do tecido diminuiu à medida que o número de ciclos de extensão de tensão aumentou.

Outro exemplo é o trabalho desenvolvido por Chen *et al.* (2019) no qual o polipirrol foi imobilizado em uma malha de poliéster com elastano por meio de polimerização interfacial em baixa temperatura para preparar um sensor de tensão condutor para medições de movimento e respiração humana. Os sensores foram fixados diretamente sobre o corpo ou no vestuário dos voluntários para a medição em tempo real dos movimentos humanos e da respiração, demonstrando que o sensor baseado em uma malha pode detectar com sensibilidade a flexão dos dedos, cotovelos e joelhos e diferenciar a respiração profunda, normal e rápida.

No estudo de Mendes (2019) o objetivo principal consistiu em estudar diferentes metodologias para funcionalizar têxteis comerciais (malha e não-tecido) para obter aplicações piezoresistivas através de polímeros condutores. Foi utilizada polimerização *in situ* do pirrol e do 3,4-etilenodioxitiofeno (EDOT). Várias condições foram estudadas com o objetivo de avaliar o melhor procedimento para obter têxteis estáveis e caracterizações morfológicas, químicas e elétricas foram estudadas antes e depois de polimerizações.

Na pesquisa de Xie *et al.* (2019) uma série de tecidos de polipirrol/algodão foram preparados intrinsecamente utilizando processo de polimerização *in situ* com diferentes proporções de concentração de Py/FeCl<sub>3</sub> (cloreto férrico) visando a aplicação como materiais eletrotérmicos flexíveis. Os resultados demonstraram que os tecidos de polipirrol/algodão apresentam altas propriedades elétricas, térmicas e resistência mecânica, que podem ser utilizados como um elemento de aquecimento flexível ideal.

Ainda, no artigo de Liu *et al.* (2023) tecidos condutores revestidos com polipirrol foram preparados adotando o método simples de polimerização *in situ* em fase líquida. Seis tipos de tecidos condutores revestidos com polipirrol foram preparados utilizando tecidos de poliéster-algodão, náilon, lã, seda, basalto e aramida, como substratos de base para a polimerização e utilizando as mesmas condições de processo.

Outro exemplo de trabalho desenvolvido é o estudo de Dou *et al.* (2022) que consistiu no desenvolvimento de sensores de deformação altamente extensíveis e compressíveis a partir de malha *spacer* por trama. Nanotubos de carbono e polipirrol foram depositados na superfície do tecido através de polimerização *in situ* para reduzir a resistividade elétrica. O trabalho demonstrou que é viável a utilização do sensor para monitorização em tempo real em *wearables*.

## 2.5 PANORAMA CIENTÍFICO

Constata-se que as estruturas *spacer* têm despertado interesse para diversas áreas. Com isso, devido aos avanços no desenvolvimento de novos materiais e têxteis inteligentes, vê-se que a compreensão do cenário de pesquisa relacionada a estes temas configura-se como essencial.

Nesta sessão será apresentado o crescimento do número de estudos relacionados às estruturas *spacer*, as malhas *spacer* por trama, têxteis inteligentes e têxteis condutores nos últimos 40 anos. Utilizou-se a plataforma *Google Scholar* para o levantamento dos dados, onde as buscas foram realizadas com os termos na língua inglesa, juntamente com o operador booleano “AND” (quando mais de um termo era pesquisado em conjunto). As quantidades encontradas para cada termo e período encontram-se no Quadro 2.

Quadro 2 – Estudos no *Google Scholar* por palavra-chave e período.

<b>Palavras-chave/Período</b>	<b>1983-1992</b>	<b>1993-2002</b>	<b>2003-2012</b>	<b>2013 – 2023 (até novembro)</b>
<i>“spacer fabric”</i>	7	35	399	3050

Palavras-chave/Período	1983-1992	1993-2002	2003-2012	2013 – 2023 (até novembro)
“ <i>spacer fabric</i> ” AND “ <i>smart textiles</i> ”	0	1	40	417
“ <i>spacer fabric</i> ” AND “ <i>conductive textiles</i> ”	0	0	12	126
“ <i>spacer fabric</i> ” AND “ <i>weft knitted</i> ”	0	3	105	839
“ <i>weft knitted spacer fabric</i> ” AND “ <i>smart textiles</i> ”	0	0	2	28
“ <i>weft knitted spacer fabric</i> ” AND “ <i>conductive textiles</i> ”	0	0	0	12

Fonte: Autora (2023).

O primeiro termo utilizado foi “*spacer fabric*” referindo-se especificamente a estrutura *spacer*. Nota-se uma tendência de crescimento ao longo das décadas, com um aumento significativo no número de estudos nas décadas de 2003-2012 para 2013-2023 equivalente a mais de 7,5 vezes. O que demonstra elevado interesse da comunidade científica e industrial por este tipo de estrutura.

Depois, adicionou-se o termo “*smart textiles*” que se refere a têxteis inteligentes. Os estudos encontrados são recentes, provenientes das últimas duas décadas, mas também apresentam um aumento relevante, superior a 10 vezes das décadas de 2003-2012 para 2013-2023.

Agora, incluindo o termo “*conductive textiles*” que corresponde aos têxteis condutores, nota-se que os estudos também são muito recentes e a quantidade encontrada é inferior aos têxteis inteligentes, pois trata-se de uma área bastante específica.

Ainda, acrescentou-se o termo “*weft knitted*” (malha por trama) e “*spacer fabric*” referindo-se as malhas *spacer* produzidas pela tecnologia de malharia por trama. Averigua-se que trabalhos que apresentam ambos os termos demonstram uma quantidade de estudos significativamente inferior e muito recente. Essa constatação indica uma escassez de estudos abordando as malhas *spacer* por trama.

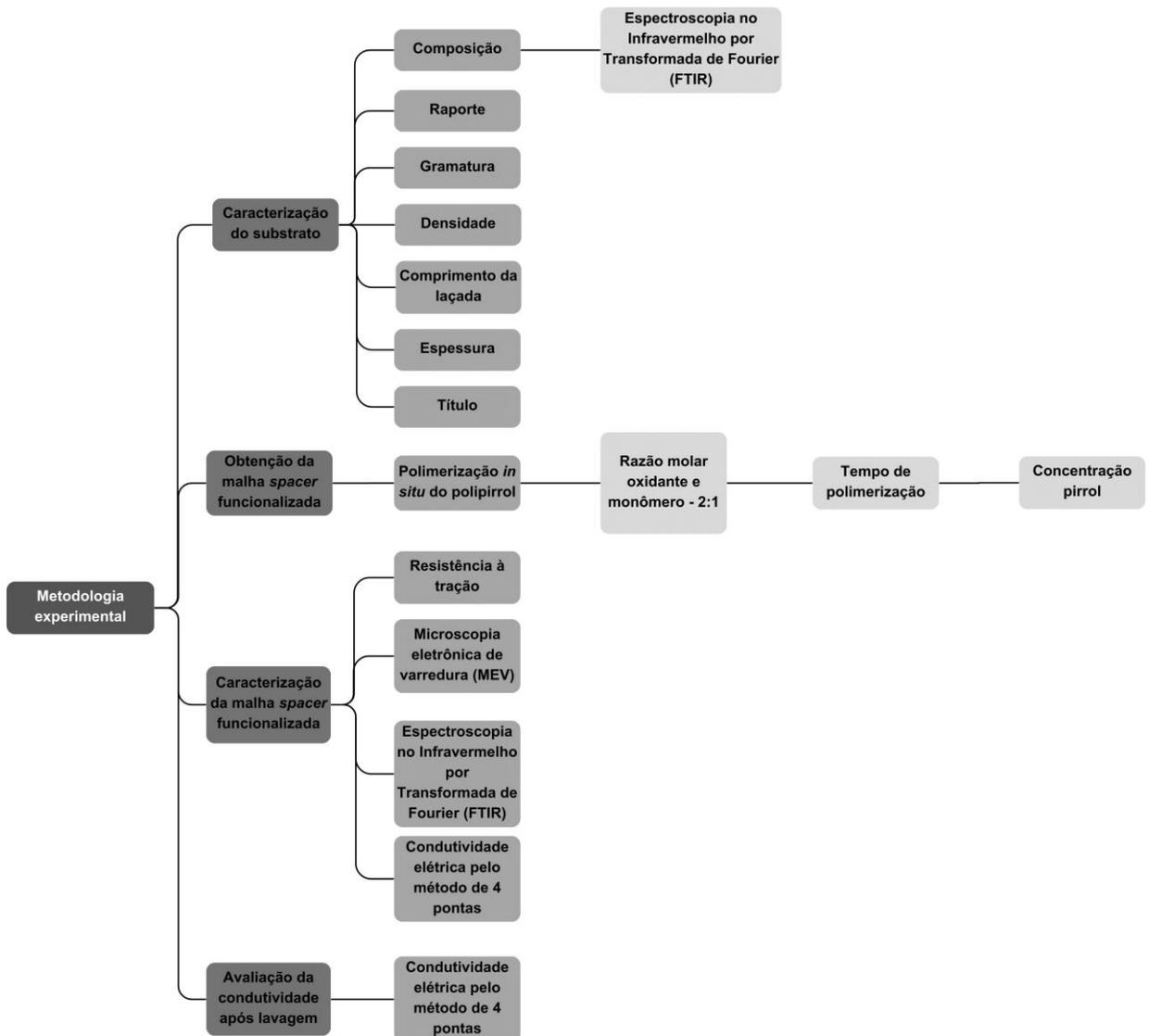
Quanto a pesquisa utilizando as palavras-chave “*weft knitted spacer fabric*” e “*smart textiles*” apura-se que os estudos começaram a ser explorados somente na última década com uma quantidade bastante baixa. Além disso, acerca da busca que incluía os termos “*weft knitted spacer fabric*” e “*conductive textiles*” observa-se uma quantidade de trabalhos ainda menor e igualmente recente.

Dessa forma, justifica-se pela revisão da literatura a pertinência deste trabalho que consiste no desenvolvimento de têxteis condutores a partir de malha *spacer* por trama e polimerização *in situ* de polipirrol.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados a descrição dos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Dessa forma, a elaboração prática do estudo consistiu em quatro etapas, conforme ilustrado na metodologia experimental da Figura 7.

Figura 7 – Metodologia experimental.



Fonte: Autora (2023).

### 3.1 MATERIAIS

O substrato utilizado foi uma malha *spacer* formada através de tear circular duplafrentura, desenvolvida com filamentos de poliéster em suas duas camadas externas (existindo a presença de elastano) com monofilamento de mesma composição como fio de ligação, oferecida pela empresa Indústria e Comércio de Malhas Benvenuti LTDA (BENUTEX Malhas).

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

No processo de lavagem das amostras funcionalizadas usufrui-se de sabão líquido.

### 3.2 MÉTODOS

#### 3.2.1 Caracterização da malha *spacer*

##### 3.2.1.1 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Para confirmar a matéria-prima que constitui o substrato utilizado empregou-se a técnica de FTIR. A análise consiste no estudo das vibrações dos átomos da molécula quando expostos à radiação infravermelha, permitindo identificar os grupos funcionais presentes no material. Além disso, uma amostra funcionalizada com polipirrol da melhor condição de polimerização passou pelo ensaio de FTIR. O equipamento utilizado foi o Espectrofotômetro Frontier FTIR, da marca Perkin Elmer, do Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), campus Blumenau. Os espectros foram obtidos na faixa de comprimento de onda de  $4000$  a  $450 \text{ cm}^{-1}$ , no modo Refletância Total Atenuada (ATR).

### 3.2.1.2 Determinação do raporte, gramatura, densidade, comprimento da laçada, espessura e título dos fios

As análises foram realizadas no Laboratório de Tecidos e Malhas (LABTEC), localizado no campus Blumenau da UFSC. Afim de verificar como se constitui a formação do substrato utilizado determinou-se o raporte, através do desmalhe/desconstrução da malha com a utilização de lupa conta-fios. Na determinação da gramatura (massa por unidade de área), seguiu-se o procedimento da norma ABNT NBR 10591:2008, utilizando 5 amostras com dimensões 10x10 cm. Com a obtenção do número de cursos e colunas por centímetro para cada camada de malha, conforme a ABNT NBR 12060:1991, calculou-se a densidade (malhas por unidade de área).

Ainda, para o comprimento da laçada o método seguido foi marcar uma primeira coluna, após o traçado contou-se 100 colunas seguintes, anotando a 101ª; desmalhou-se o curso marcado e mediu-se seu comprimento utilizando equipamento *Maillimeter* (Figura 8a), efetuando a divisão entre o comprimento obtido e a quantidade de colunas. Esta análise foi realizada nas duas camadas que constituem a malha *spacer* e em pontos diferentes na largura e comprimento da amostra.

Em relação a espessura, utilizou-se o paquímetro digital da marca Zaas (Figura 8b) para determinar os valores em milímetros. Aferiu-se as amostras antes e após a funcionalização, e cada amostra foi medida em 5 pontos distintos.

Figura 8 – a) Maillimeter; b) Paquímetro digital.



Fonte: Autora (2023).

Quanto a determinação do título, seguiu-se as diretrizes da norma ABNT NBR 13216:1994. Retirou-se carreiras sucessivas de ambas as camadas da malha com

comprimento mínimo de 520 mm para obter-se os corpos de prova. Os filamentos foram inseridos no *Maillimeter* e o comprimento registrado sob a ação da carga de pré-tensão que eliminou as ondulações presentes. Pesou-se os corpos de prova com comprimento conhecido em balança analítica. As medições foram repetidas em 10 amostras para cada face da malha e para o fio de ligação. Os títulos foram obtidos em Tex e Ne.

### 3.2.2 Obtenção da malha *spacer* revestida com polipirrol

As polimerizações ocorreram no Laboratório de Transformações e Materiais Avançados (LTMA), UFSC, campus Blumenau. Durante o processo de polimerização do polipirrol, as malhas foram submersas em água submetidas à polimerização *in situ* do monômero pirrol, segundo a metodologia reportada por Maestri *et al* (2023). A razão molar utilizada entre o oxidante cloreto férrico hexahidratado (270,3 g/mol) e o monômero pirrol (67,09 g/mol) foi de 2:1. Os tempos de 60 min e 30 min de polimerização foram utilizados, e as concentrações do monômero foram iguais a 0,050 mol/L, 0,033 mol/L e 0,025 mol/L. Todas as condições, conforme Tabela 1, foram realizadas em triplicata para amostras com dimensões de 4x4 cm.

Tabela 1 – Obtenção das malhas condutoras.

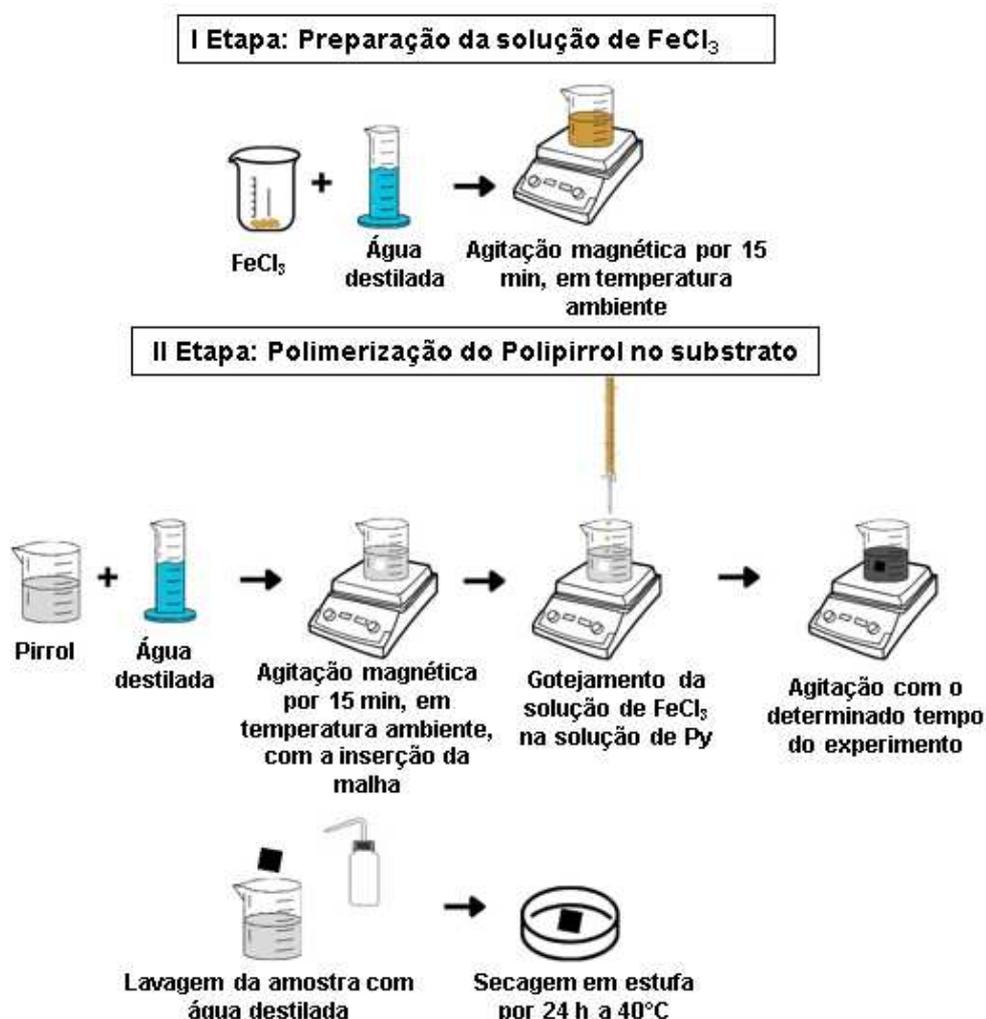
Substrato	Razão molar oxidante/monômero	Tempo de polimerização (min)	Concentração Py (mol/L)	Massa Py (g)
Malha <i>spacer</i> por trama	2:1	60	0,050	0,268
			0,033	0,179
			0,025	0,134
		30	0,050	0,268

Fonte: Autora (2023).

Um esquema ilustrativo do processo experimental da polimerização do polipirrol pode ser observado na Figura 9. Em um béquer de 100 mL pesou-se a massa de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  correspondente a condição experimental e adicionou-se 25 mL de água destilada. A solução foi mantida em agitação magnética por 15 min, em

temperatura ambiente, até a dissolução completa do  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Após o período, a solução foi inserida em um bureta graduada. Em outro béquer de 250 mL pesou-se a massa de pirrol apropriada para a condição experimental, acrescentou-se 80 mL de água destilada e a amostra de malha *spacer*. A solução foi mantida sob agitação por 15 min. Após este tempo, gotejou-se lentamente a solução de  $\text{FeCl}_3$  na solução de Py. Assim que toda a solução foi gotejada, iniciou-se a cronometragem do tempo de polimerização, que variou de acordo com a condição experimental, permanecendo em agitação. Por fim, após a polimerização, as amostras foram cuidadosamente lavadas com água destilada para eliminar resíduos da reação e secas em estufa por 24 h a  $40^\circ\text{C}$ .

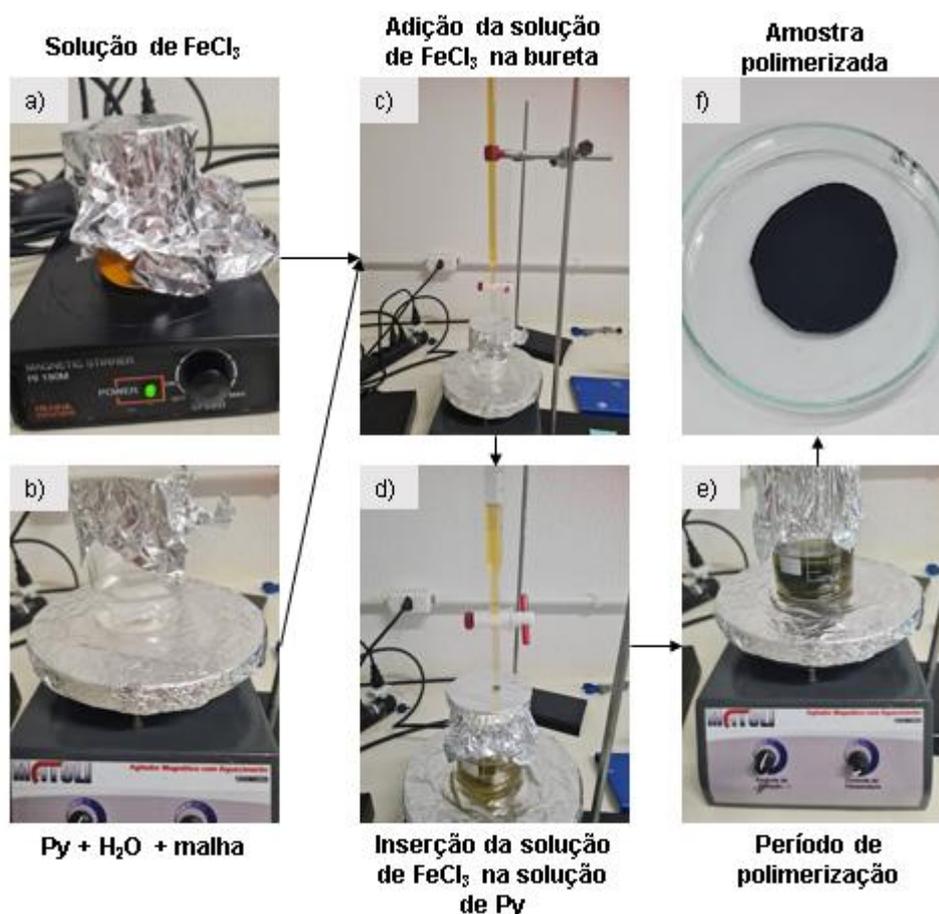
Figura 9 – Esquema ilustrativo do processo de polimerização oxidativa *in situ* do pirrol nas amostras de malha *spacer*.



Fonte: Autora (2023).

O processo de polimerização em imagens pode ser visualizado na Figura 10.

Figura 10 – Processo de polimerização *in situ* nas amostras de malha.



Fonte: Autora (2023).

### 3.2.3 Caracterização da malha *spacer* funcionalizada

#### 3.2.3.1 Condutividade elétrica pelo método de 4 pontas

As amostras de malha contendo polipirrol foram submetidas à ensaios de determinação da condutividade elétrica pelo método de 4 pontas, realizado no Laboratório de Pesquisa em Polímeros e Compósitos (POLICOM), na UFSC, Florianópolis. Nesta análise, uma determinada corrente elétrica é aplicada pela amostra e a tensão resultante é mensurada. Foram utilizados dois equipamentos separados: um eletrômetro Keythley, modelo 6517A (esquerda) para a leitura da tensão e uma unidade de fonte e medida (SMU) Keythley, modelo 2410 (direita) para o fornecimento da corrente, conforme Figura 11.

Figura 11 – Equipamentos utilizados para determinação da condutividade elétrica pelo método de 4 pontas.



Fonte: Autora (2023).

Foram realizadas 3 medidas em locais distintos da amostra, em ambos os lados. Dessa forma, a condutividade foi obtida através da Equação 1.

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

Onde:

$\sigma$  = condutividade elétrica em  $\text{S.cm}^{-1}$

$w$  = espessura da amostra em cm

$V$  = tensão elétrica mensurada em V

$I$  = corrente elétrica fornecida em A

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

Sendo que a resistividade elétrica pode ser definida como sendo o inverso da condutividade elétrica de acordo com a Equação 2.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$\rho$  = resistividade elétrica superficial em  $\Omega.\text{cm}$

A partir da obtenção do resultado da maior condutividade entre as amostras, definiu-se a melhor condição de polimerização para seguir com as demais análises, como resistência a tração, FTIR e avaliação da condutividade após lavagem.

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

A análise de MEV foi utilizada para avaliar a morfologia das amostras antes e após funcionalização polipirrol. As imagens foram obtidas em microscópio eletrônico da marca Jeol, modelo JSM-6390LV, do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), da UFSC, em Florianópolis, com magnitudes de ampliação de 25x, 50x, 500x, 1000x e 2000x. Inicialmente, as amostras foram depositadas em *stubs* para depois passarem por um processo de revestimento com ouro.

### *3.2.3.3 Resistência à tração*

O ensaio de tração nas malhas antes e após a funcionalização foi norteado pela norma ISO 13934-1:2016, e foi realizado com o objetivo de verificar se a polimerização acarreta mudanças nas propriedades mecânicas do substrato empregado. O equipamento utilizado foi a máquina universal de ensaios da marca Instron, presente no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM), campus Blumenau, UFSC. As amostras continham as dimensões de 40x40 mm e a taxa utilizada foi de 100 mm/min.

### **3.2.4 Resistência à lavagem**

Este ensaio tem o intuito de analisar a solidez à lavagem das amostras funcionalizados e avaliar a ocorrência de alterações nos valores de condutividade elétrica. O procedimento seguiu de forma adaptada a norma NBR ISO 105-C06:2010. Em cada Erlenmeyer foi adicionado uma amostra de malha, água e o detergente líquido sem branqueador ótico em 4 g/L, sem esferas, durante 30

minutos, com temperatura de 40 °C. Para cada amostra simulou-se 1, 5 e 10 lavagens em triplicata.

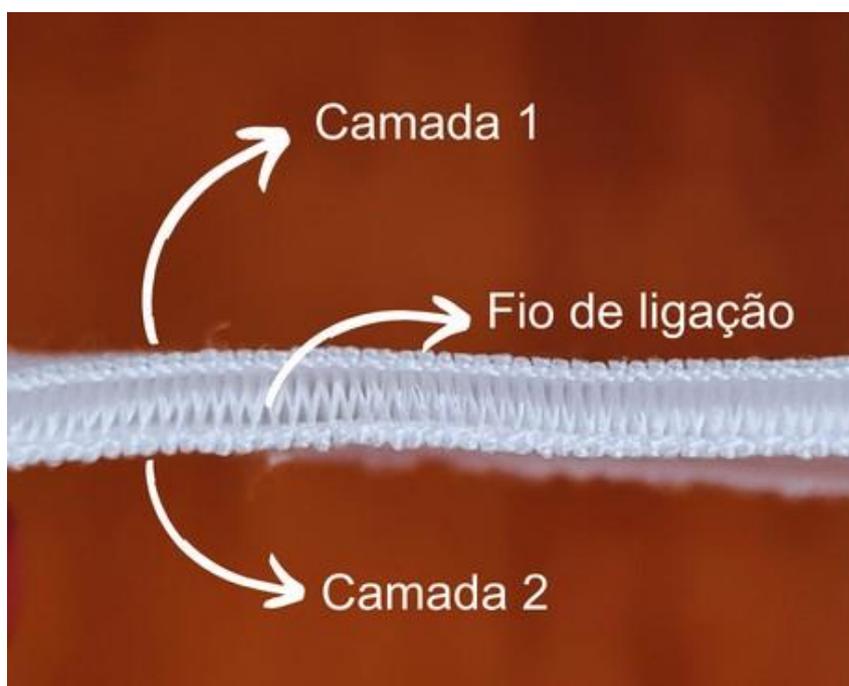
Ainda, realizou-se a análise de perda de massa pesando as amostras antes e após lavagem em balança analítica para verificar a diferença percentual e avaliar sua relação com os valores de condutividade obtidos após o processo.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA *SPACER*

Nesta seção serão apresentadas as informações obtidas sobre as características e propriedades da malha *spacer* utilizada como substrato do presente trabalho. Na Figura 12 verifica-se uma amostra da malha e a definição das suas camadas. A camada 1 corresponde a face desenvolvida no disco do tear circular enquanto a camada 2 refere-se ao cilindro.

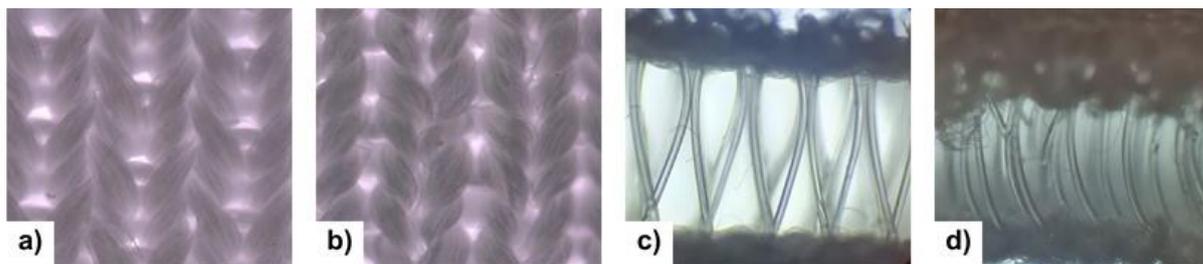
Figura 12 – Amostra de malha *spacer*.



Fonte: Autora (2023).

A seguir encontram-se as imagens de microscopia ótica relativas à sessão transversal da malha na direção das colunas (Figura 13c) e na direção das carreiras (Figura 13d), além da camada 1 (Figura 13a) e camada 2 (Figura 13b). A ampliação das imagens é de 5 vezes.

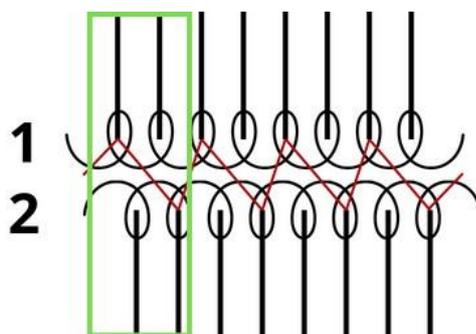
Figura 13 – Microscopia da a) Camada 1 b) Camada 2 e sessão transversal da malha *spacer* na direção c) das colunas e d) das carreiras.



Fonte: Autora (2023).

A partir da análise das imagens anteriores e da desconstrução da malha constatou-se que se trata do padrão *jersey* (meia-malha) para ambas as superfícies. Dessa forma, o raporte (Figura 14) da malha *spacer* é construído somente com laçadas normais, no qual o fio de ligação encontra-se depositado com um intervalo de uma coluna entre as superfícies.

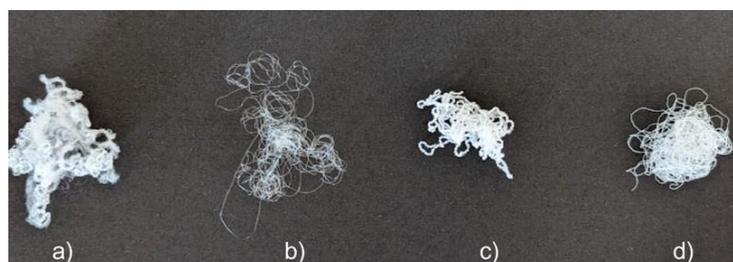
Figura 14 – Raporte malha *spacer*.



Fonte: Autora (2023).

Os filamentos que compõem a malha *spacer* também foram analisados com base no desmalhe de amostras. Nota-se a presença de quatro filamentos diferentes, exemplificados na Figura 15.

Figura 15 – Filamentos presentes na malha.



Fonte: Autora (2023).

Dessa forma, cada amostra representa: a) filamento presente na camada 1; b) fio de ligação que une as duas camadas de malha; c) filamento da camada 2; e d) é o elastano, que estava presente nas duas camadas. Destaca-se também que os filamentos a) e c) tratam-se de multifilamentos texturizados, ao passo que b) e c) correspondem a monofilamentos. Suas composições foram verificadas através do ensaio de FTIR. A Tabela 2 apresenta os títulos médios encontrados para os filamentos seguindo a nomenclatura da Figura 15.

Tabela 2 – Títulos médios.

Filamento/Multifilamento	Título (Tex)	Desvio padrão (Tex)	Título (Ne)	Desvio padrão (Ne)
<b>a</b>	8,7	0,2	68	2
<b>b</b>	8,0	0,3	74	2
<b>c</b>	7,4	0,3	80	3
<b>d</b>	19,7	0	30	0

Fonte: Autora (2023).

A gramatura média encontrada para a malha foi de 452 g/m<sup>2</sup>. Percebe-se que se trata de uma gramatura elevada quando comparada a malha *jersey* convencional, por exemplo, visto que a malha utilizada corresponde a duas camadas de malha *jersey* mais um fio de ligação. Na Tabela 3 são apresentados os valores de gramatura obtidos para cada uma das amostras.

Tabela 3 – Gramatura malha *spacer*.

Amostra	Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	Média (g/m <sup>2</sup> )	Desvio Padrão (g/m <sup>2</sup> )
1	451		
2	450		
3	462	452	8
4	441		
5	458		

Fonte: Autora (2023).

Ainda, na Tabela 4 apresenta-se os valores encontrados para o comprimento da laçada nas duas camadas que compõem a malha *spacer*. Constata-se que o comprimento é igual para ambas, demonstrando que este parâmetro pode estar associado a estabilidade dimensional.

Tabela 4 – Comprimento da laçada.

<b>Camada</b>	<b>Comprimento da laçada (cm)</b>	<b>Desvio padrão (cm)</b>
1	0,237	0,002
2	0,237	0,001

Fonte: Autora (2023).

Na Tabela 5 encontra-se a quantidade de carreiras e colunas por centímetro para cada camada da malha e suas respectivas quantidades de malhas/cm<sup>2</sup>.

Tabela 5 – Quantidade carreiras/cm e cursos/cm.

<b>Camada</b>	<b>Carreiras/cm</b>	<b>Cursos/cm</b>	<b>Malhas/cm<sup>2</sup></b>
1	15,8	37,4	590,2
2	15,8	37,0	584,6

Fonte: Autora (2023).

Por fim, a espessura obtida para a malha *spacer* antes da polimerização está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Espessura malha *spacer*.

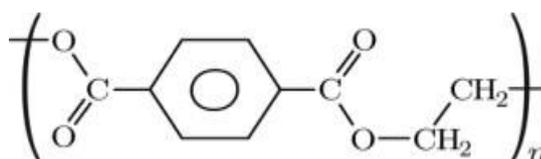
<b>Amostra</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Espessura média (mm)</b>	<b>Desvio padrão (mm)</b>
1	2,68		
2	2,73		
3	2,67	2,69	0,02
4	2,69		
5	2,70		

Fonte: Autora (2023).

#### 4.1.1 FTIR dos filamentos da malha *spacer*

Amostras dos filamentos presentes na malha *spacer*, com exceção do elastano, foram analisadas pela técnica de FTIR. Esta análise foi realizada para confirmação da sua matéria-prima, oriunda do polímero poliéster, que possui como mero a estrutura apresentada na Figura 16.

Figura 16 – Unidade de repetição do poliéster.

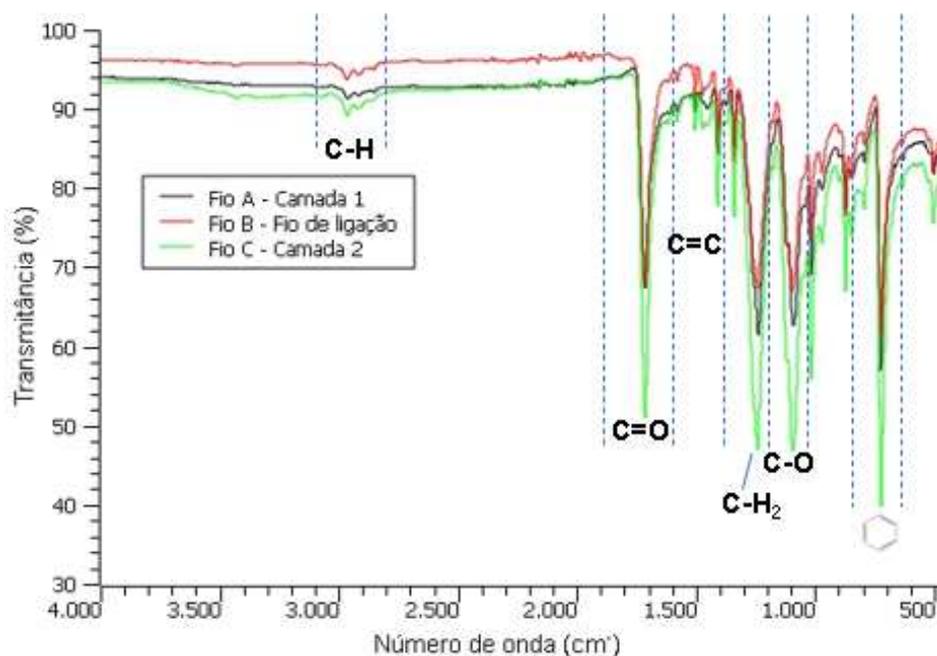


Fonte: Chen, Hay e Jenkins (2012).

A Figura 17 apresenta os espectros de FTIR dos filamentos presentes nas camadas 1 e 2 e fio de ligação, todos de poliéster. As bandas entre 3030 e 2952  $\text{cm}^{-1}$  estão relacionadas as ligações de C-H. Em 1711  $\text{cm}^{-1}$  observa-se uma banda bastante intensa, correspondente a ligação C=O. As bandas em 1575 e 1338  $\text{cm}^{-1}$  são atribuídas a ligação C=C, indicando a presença de um anel aromático no polímero. Em 1338  $\text{cm}^{-1}$  existe a presença da ligação C-H<sub>2</sub>. A ligação C-O ocorre em aproximadamente 1240  $\text{cm}^{-1}$ . Em 722  $\text{cm}^{-1}$  encontra-se uma banda relacionada ao anel aromático. Essas faixas de comprimento de onda confirmam a estrutura química do polímero poliéster, conforme descrito na literatura (Maestri, 2022; Cecen *et al.*, 2008).

Além disso, percebe-se que ocorreu um deslocamento nos espectros dos três filamentos, que dependem do contato e profundidade de penetração da radiação nas amostras. E, esta ocorrência também pode ser esclarecida pela cor de cada um dos filamentos uma vez que quanto mais esbranquiçada a amostra, menor a transmitância e quanto mais transparente, maior a transmitância. Isto ocorre pela maior facilidade que o feixe de luz encontra na passagem pelas amostras mais transparentes.

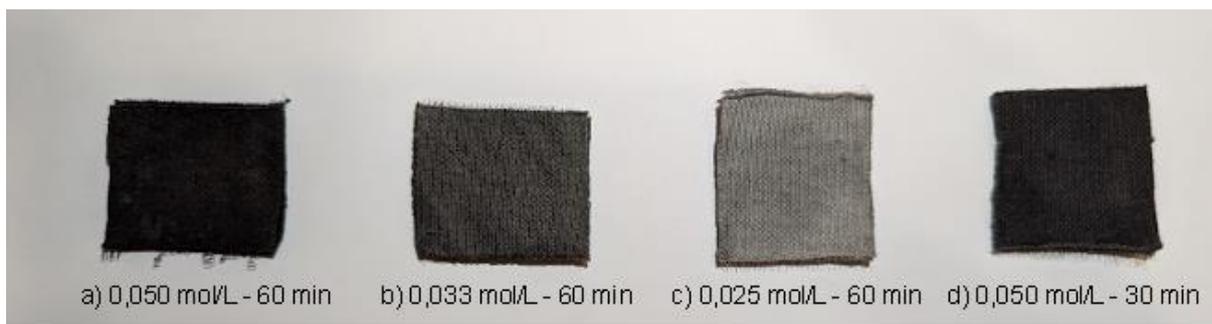
Figura 17 – FTIR dos filamentos presentes na malha *spacer*.



Fonte: Autora (2023).

#### 4.2 POLIMERIZAÇÃO *IN SITU* DO PIRROL NAS AMOSTRAS DE MALHA

O processo de polimerização do pirrol foi realizado conforme descrito no item 3.2.2. Observa-se que a malha apresentou o PPy depositado na sua superfície, justamente por apresentar cor escura, proveniente do PPy. Na Figura 18 estão representadas as amostras funcionalizadas. A amostra (a) corresponde a condição de 0,05 mol/L – 60 min, a (b) 0,033 mol/L – 60 min, (c) 0,025 mol/L – 60 min e (d) 0,05 mol/L – 30 min. Nota-se que com a diminuição da concentração do monômero de Py também ocorre uma diminuição na intensidade do escurecimento das amostras, devido a menor quantidade de polímero formado e depósito sobre a amostra. Ademais, percebe-se que ao manusear as amostras a condição que mais soltou resíduos de partículas do PPy foi a condição de 0,05 mol/L – 60 min, seguida da condição de 0,05 mol/L – 30 min, 0,033 mol/L – 60 min e 0,025 mol/L – 60 min.

Figura 18 – Amostras de malha *spacer* após funcionalização.

Fonte: Autora (2023).

As espessuras mensuradas para as diferentes condições de polimerização podem ser encontradas na Tabela 7. Verifica-se que todas as amostras apresentam a mesma espessura quando o desvio padrão é considerado. Em razão de que a deposição do PPy na superfície ocorre em uma escala micrométrica segundo Lin *et al.* (2005).

Tabela 7 – Espessura malha *spacer* antes e após funcionalização.

<b>Amostra</b>	<b>Espessura média (mm)</b>	<b>Desvio padrão (mm)</b>
Antes	2,69	0,02
0,050 mol/L – 60 min	2,73	0,03
0,033 mol/L – 60 min	2,72	0,03
0,025 mol/L – 60 min	2,69	0,01
0,050 mol/L – 30 min	2,68	0,02

Fonte: Autora (2023).

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA MALHA *SPACER* FUNCIONALIZADA

#### 4.3.1 Condutividade elétrica

As amostras de malha contendo PPy foram analisadas quanto à sua condutividade elétrica. Na Tabela 8 estão apresentados os valores de condutividade elétrica, para as diferentes condições de polimerização testadas, obtidas através do método de 4 pontas.

Tabela 8 – Condutividade elétrica das amostras após funcionalização.

<b>Condição</b>	<b>Condutividade média (S.cm<sup>-1</sup>)<sup>1)</sup></b>	<b>Desvio padrão (S.cm<sup>-1</sup>)</b>
0,050 mol/L – 60 min	$3,80 \times 10^{-4}$	$9,26 \times 10^{-5}$
0,033 mol/L – 60 min	$8,77 \times 10^{-7}$	$3,04 \times 10^{-7}$
0,025 mol/L – 60 min	Não foi possível mensurar	-
0,050 mol/L – 30 min	$4,39 \times 10^{-4}$	$6,72 \times 10^{-5}$

Fonte: Autora (2023).

Primeiramente, as amostras na condição de 0,025 mol/L – 60 min não obtiveram sucesso na medição da condutividade pelo método de 4 pontas devido a sua elevada resistividade. A medição através do método de 2 pontas foi cogitada, entretanto, as dimensões da amostra não atendiam as especificações necessárias, uma vez que precisavam ser maiores.

Agora, sobre as demais condições, percebe-se que a de 0,033 mol/L – 60 min apresentou valores de desvio padrão elevados, podendo ser decorrentes de uma má igualização da polimerização das amostras.

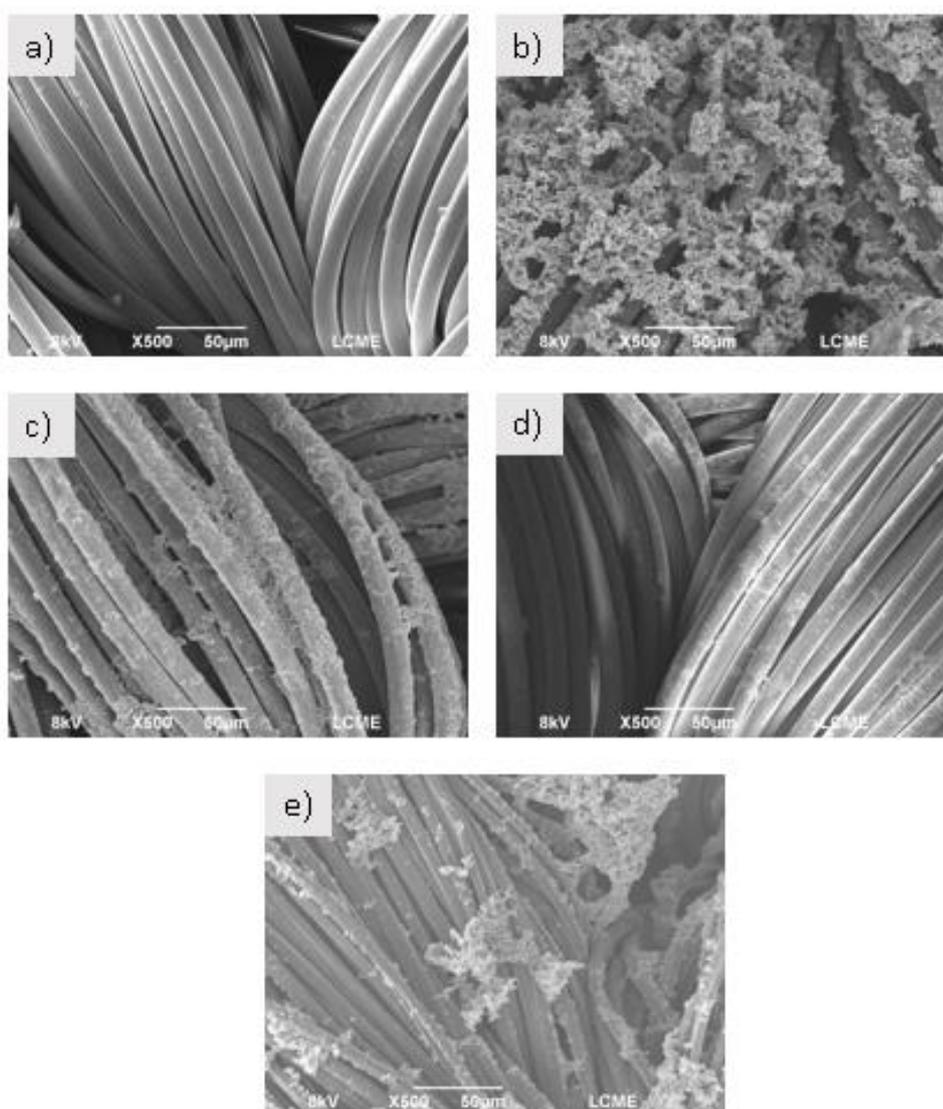
Para as condições 0,050 mol/L – 60 min e 0,050 mol/L – 30 min, onde o fator de variação foi a redução do tempo de polimerização, percebe-se que apesar da diminuição ocorre um aumento na condutividade elétrica. Dessa forma constatou-se que a melhor condição foi a de 0,050 mol/L – 30 min para a análise da condutividade elétrica. A análise de resistência a tração e a avaliação da condutividade após lavagem seguiram com esta condição.

Ainda sobre os valores obtidos os mesmos são considerados satisfatórios quando comparados com outros valores referenciais de condutividade elétrica de polímeros analisados isoladamente, como o poliacetileno (de  $10^{-6}$  a  $10^4$  S.cm<sup>-1</sup>) e o PPy (de  $10^{-8}$  a  $10^2$  S.cm<sup>-1</sup>) (Maestri, 2022). Entretanto, tomando como exemplo o estudo de Babu, Subramanian e Kulandainathan (2013) em que um substrato têxtil de poliéster foi funcionalizado com PPy, este atingiu valores de condutividade  $0,92 \times 10^{-2}$  S.cm<sup>-1</sup>. Assim, nota-se que resultados superiores já foram alcançados.

### 4.3.2 Microscopia eletrônica de varredura das condições experimentais

As amostras de malha *spacer* após a funcionalização nas diferentes condições de polimerização também foram avaliadas quanto à sua morfologia (Figura 19), e a presença do polipirrol nas mesmas pode ser observada. Averiguou-se que conforme a concentração de Py reduz ocorre uma diminuição significativa na quantidade de PPy aderido à superfície da fibra de poliéster. Ainda, verificou-se que o polipirrol se apresenta na forma de aglomerados porosos.

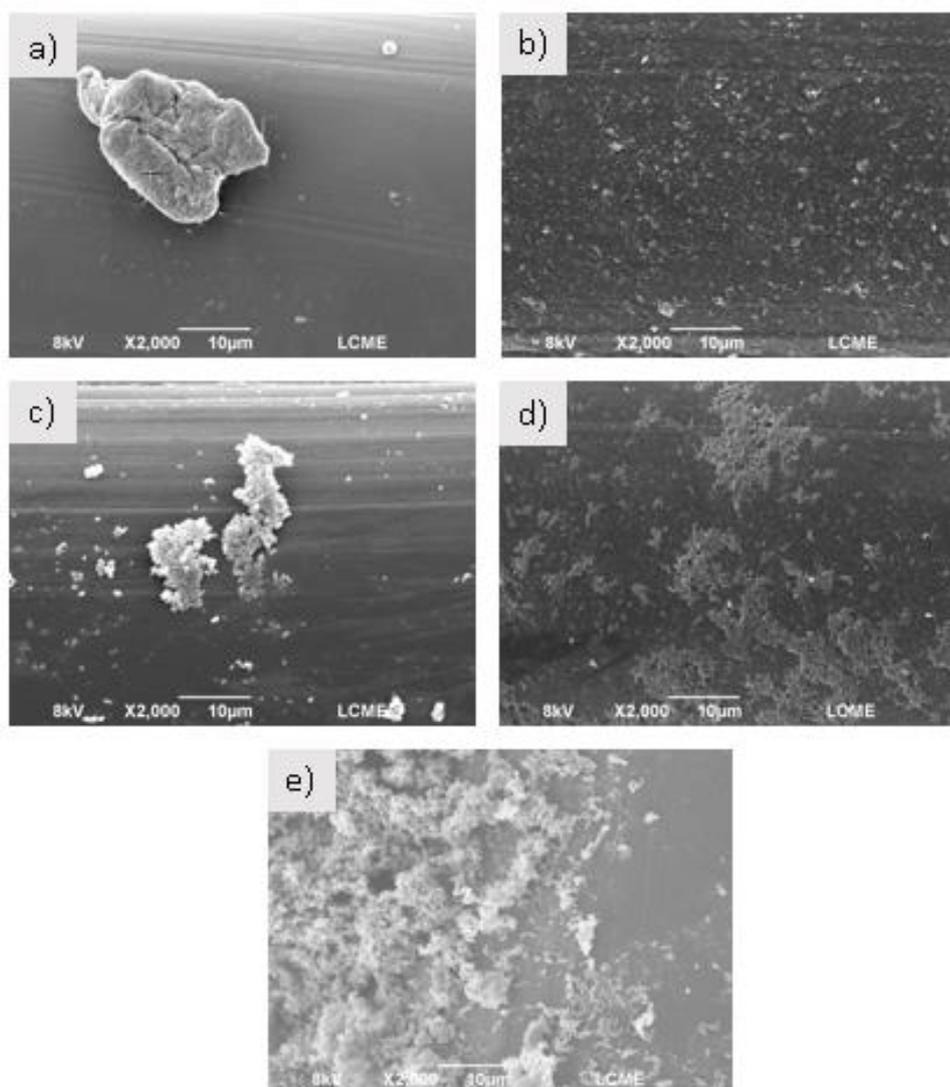
Figura 19 – Micrografias da superfície das amostras a) antes da funcionalização; após funcionalização nas condições b) 0,050 mol/L – 60 min, c) 0,033 mol/L – 60 min, d) 0,025 mol/L – 60 min, e) 0,050 mol/L – 30 min, com aumento de 500x.



Fonte: Autora (2023).

Também foi avaliada a adesão do PPy na sessão transversal da malha *spacer*, para isso foram realizadas micrografias dos fios de ligação das amostras nas diferentes condições de polimerização, visualizadas na Figura 20.

Figura 20 – Micrografias dos fios de ligação a) antes da funcionalização; e após funcionalização nas condições b) 0,050 mol/L – 60 min, c) 0,033 mol/L – 60 min, d) 0,025 mol/L – 60 min, e) 0,050 mol/L – 30 min, com aumento de 2000x.



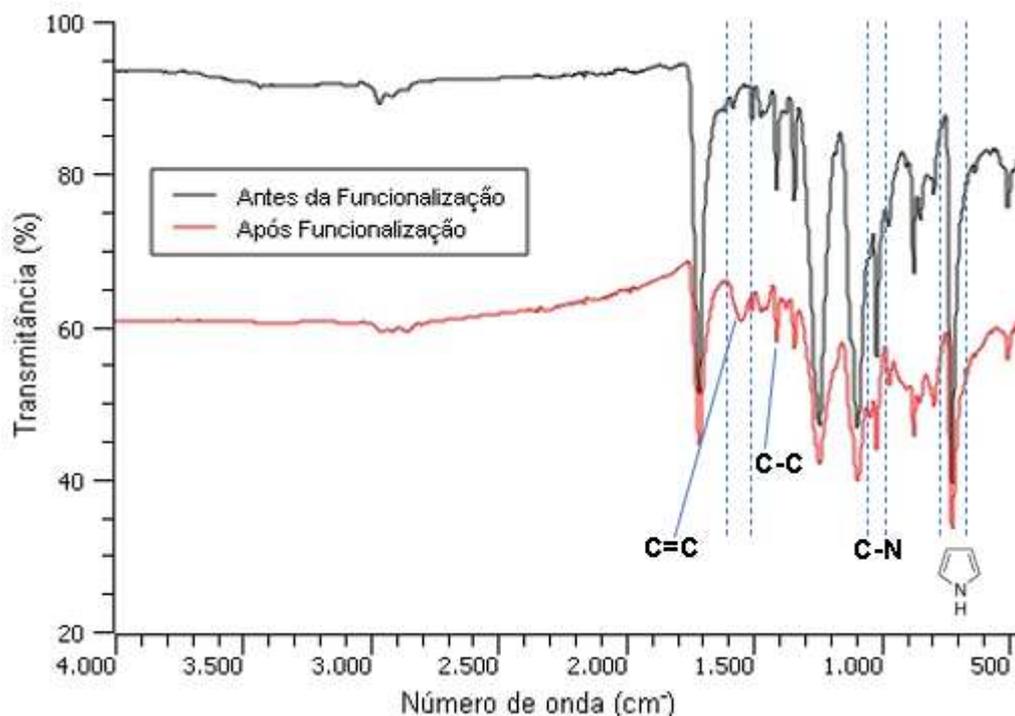
Fonte: Autora (2023).

Na Figura 20a) observa-se a presença de um aglomerado que pode ser um resíduo resultante do processo de produção do filamento ou então da formação da malha. Ainda, nas demais micrografias observa-se que a adesão do PPy nos fios de ligação ocorreu na forma de partículas nas (Figuras 20b e 20d), e em algumas condições experimentais como aglomerados (Figura 20c e 20e).

### 4.3.3 FTIR após funcionalização

Na Figura 21 encontram-se os espectros de FTIR antes e após a polimerização de uma das amostras da condição 0,050 mol/L – 30 min. A maioria das bandas permanece inalterada mesmo após a polimerização com polipirrol. Mas alguns picos característicos de PPy são observados em  $1552\text{ cm}^{-1}$  para ligação C=C,  $1408\text{ cm}^{-1}$  para C-C,  $1093\text{ cm}^{-1}$  para C-N e modos de flexão de anel aromático característicos em  $721\text{ cm}^{-1}$ , o que está de acordo com o estudo de Babu, Subramanian e Kulandainathan (2013). Dessa forma é demonstrado que existe a presença de grupos funcionais característicos do PPy nas amostras após funcionalização.

Figura 21 – FTIR amostra após funcionalização.



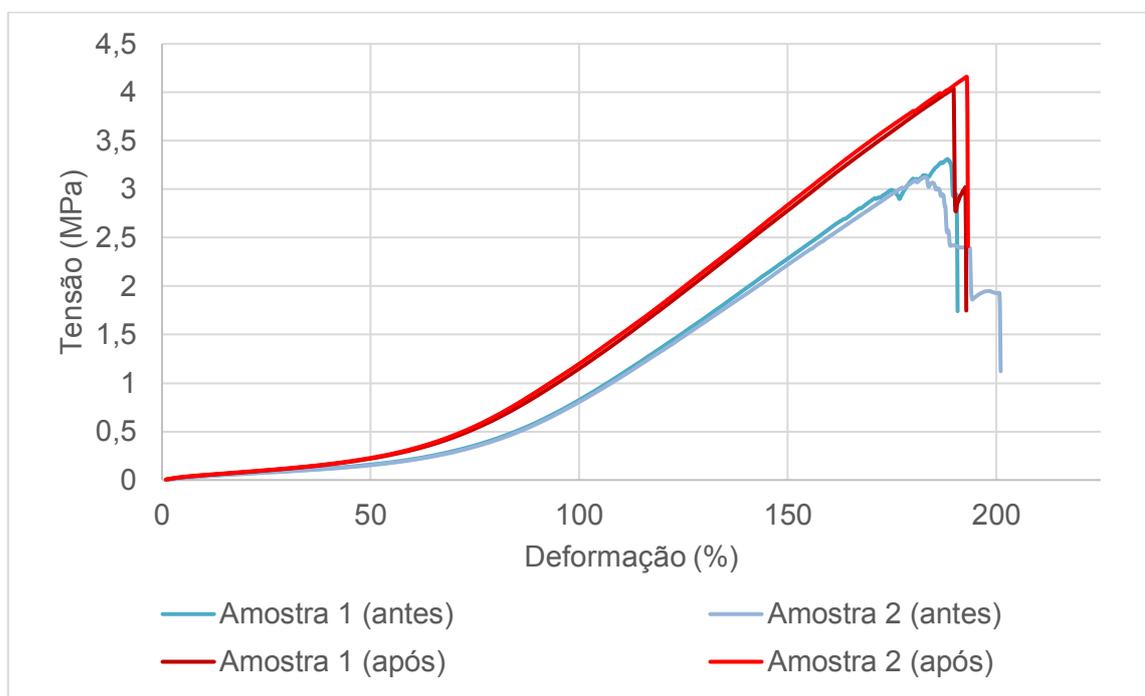
Fonte: Autora (2023).

### 4.3.4 Resistência à tração

A Figura 22 ilustra o comportamento das amostras de malha *spacer* antes e após a funcionalização na direção das colunas. É possível observar que a adição de polipirrol na malha resulta tanto em um pequeno aumento no deslocamento atingido,

indicando uma maior capacidade de deformação antes da ruptura, quanto um aumento na tensão máxima alcançada, resultando em uma resistência superior à tração. E em relação a tensão de ruptura, observa-se que ocorreu um aumento de  $2,63 \pm 0,08$  MPa para  $3,59 \pm 0,81$  MPa.

Figura 22 – Diagrama de tensão x deformação na direção das colunas.



Fonte: Autora (2023).

No artigo de Alzate, Peñafiel e Binag (2022) 3 diferentes tecidos planos com composições de 100% poliéster, 80% poliéster (urdume) e 20% fibra de abacaxi (trama), 80% poliéster (urdume e trama) e 20% fibra de aguapé (trama), foram estudados. Os resultados do ensaio de tração demonstraram que após a polimerização *in situ* do PPy na superfície desses substratos as resistências a tração aumentaram quando comparadas a antes da funcionalização para as condições em que o poliéster estava envolvido, o que está de acordo com os resultados obtidos no presente trabalho. Isto indica que o poliéster é resistente mesmo após a polimerização *in situ* do PPy na sua superfície resistindo às condições adversas do processo de polimerização. Além disso, segundo o estudo verifica-se que o mesmo não ocorre para as fibras naturais.

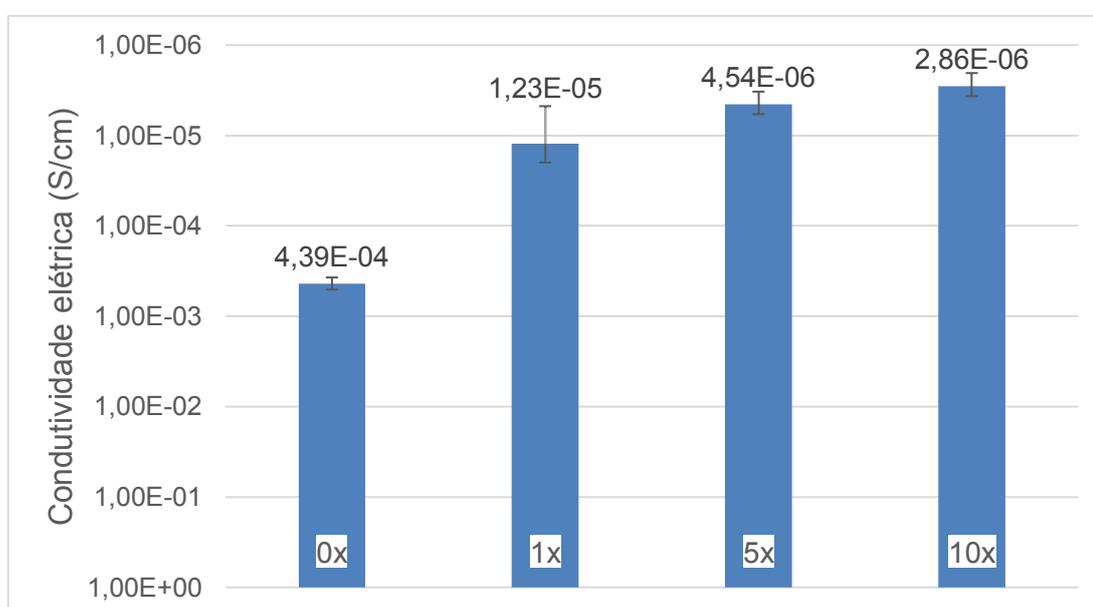
#### 4.4 CONDUTIVIDADE APÓS LAVAGEM

A fim de verificar qual seria o comportamento das amostras funcionalizadas sobre a ação de lavagem que simula a lavagem convencional de substratos têxteis, realizou-se este processo por 1x, 5x e 10x. Foram verificados os valores de condutividade elétrica através do método de 4 pontas, além da perda de massa e análise de alterações morfológica por meio de micrografias.

Na Figura 23 encontra-se o gráfico com os valores obtidos para a condutividade elétrica. Nota-se que a diminuição dos resultados foi proporcional ao aumento das lavagens. Vale ressaltar que o valor obtido para a amostra após a polimerização era de  $4,39 \times 10^{-4} \text{ S.cm}^{-1}$ . Com isso observa-se a queda de uma ordem decimal para uma lavagem e de duas ordens para cinco e dez lavagens, demonstrando que a condutividade sofre pequenas alterações devido a este processo.

Ainda se identifica que o desvio padrão obtido para as lavagens em 1x, 5x e 10x, foi de  $7,59 \times 10^{-6} \text{ S.cm}^{-1}$ ,  $1,27 \times 10^{-6} \text{ S.cm}^{-1}$  e  $8,20 \times 10^{-7} \text{ S.cm}^{-1}$ , respectivamente. Este fator pode ser devido ao método como foi aferida a condutividade, pois as medidas são realizadas em diferentes pontos das amostras que podem conter quantidades diferentes de PPy incorporadas a superfície.

Figura 23 – Gráfico de condutividade elétrica após lavagem.



Fonte: Autora (2023).

Relativamente a perda de massa ocasionada pelo processo de lavagem os valores estão apresentados na Tabela 9. A maior diferença foi obtida em uma lavagem, seguida das dez lavagens e por fim em cinco lavagens. Percebe-se que a redução de massa não foi linear e isto pode ter ocorrido devido a uma diferença na umidade que se encontrava nas amostras no momento da pesagem antes das lavagens e após este processo e já secas em estufa.

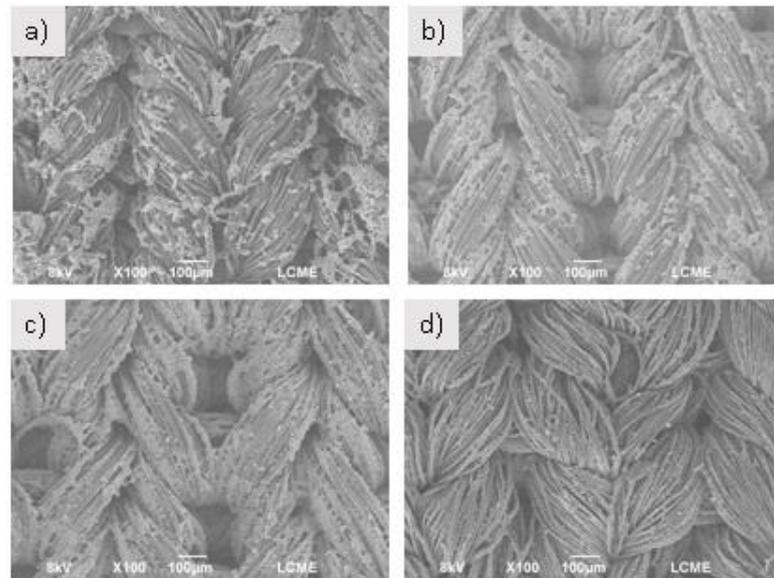
Tabela 9 – Perda de massa após lavagem.

<b>Quantidade lavagens</b>	<b>Amostra</b>	<b>Diferença percentual</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
1x	1	0,83%	0,45%	0,35%
	2	0,16%		
	3	0,34%		
5x	4	0,05%	0,05%	0,04%
	5	0,09%		
	6	0,00%		
10x	7	0,12%	0,12%	0,02%
	8	0,14%		
	9	0,10%		

Fonte: Autora (2023).

Por fim, através das micrografias obtidas por meio do MEV (Figura 24) constata-se que ocorre redução da quantidade de PPy presente na superfície das amostras analisadas em maior notoriedade após o processo de lavagem em 10x, o que vai de acordo com a redução da condutividade, uma vez que após 10x é obtido o menor valor.

Figura 24 – Micrografias das amostras a) antes da lavagem, b) após 1x c) após 5x e d) após 10x, com aumento de 100x.



Fonte: Autora (2023).

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo buscou desenvolver têxteis condutores a partir de malha *spacer* por trama e funcionalização com polipirrol utilizando diferentes concentrações do monômero pirrol e tempos de polimerização.

O processo de polimerização *in situ* apresentou boa formação do polipirrol na superfície das malhas e por entre os filamentos que compõem as mesmas. Ademais, verificou-se que não ocorre alteração significativa na espessura da malha. Já em relação a sua cor, após a polimerização as amostras passam a ser mais escuras.

A condutividade elétrica obtida foi superior para a condição experimental de 0,05 mol/L e 30 min, verificando-se que a maior concentração de Py acarretou em um melhor resultado neste parâmetro. Entretanto, quando se diminui o tempo de polimerização de 60 min para 30 min, aumentou-se os valores de condutividade o que demonstra que o tempo de polimerização pode ser reduzido, sendo uma vantagem para futuras aplicações industriais.

Com este resultado realizou-se o ensaio de resistência à tração que demonstrou propriedades mecânicas de tração superiores para a amostra após a funcionalização do que antes. Além disso, verificou-se através do FTIR a presença de grupos funcionais que são correspondentes a estrutura química do polipirrol. E mediante as micrografias do MEV observou-se a incorporação do polipirrol tanto nas superfícies como nos fios de ligação, no formato de aglomerados e partículas.

No que diz respeito a condutividade elétrica após o processo de lavagem ocorreu uma diminuição linear para as amostras lavadas 1x, 5x e 10x. Já a perda de massa não apresentou o mesmo comportamento, pois a maior perda aconteceu para 1x e a menor para 5x. As micrografias do MEV indicaram que ocorre redução na quantidade de PPy na superfície do substrato em maior notoriedade após 10x. Com isso, determinou-se que a malha condutora foi resistente a lavagem.

Portanto, infere-se que foi possível desenvolver malhas condutoras com uma estrutura *spacer*, produzida através da tecnologia de malharia por trama e em tear circular, por intermédio da polimerização do polipirrol e que seus resultados são promissores no desenvolvimento de têxteis condutores e eletrônicos.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- a) Avaliar se ocorre comportamento piezoresistivo;
- b) Testar outras condições experimentais em relação a quantidade de monômero e tempo de polimerização, além de verificar a influência da variação da temperatura no processo de polimerização;
- c) Avaliar a condutividade após submeter as amostras à esforços mecânicos repetitivos, ou seja, a fadiga do material desenvolvido;
- d) Avaliar a utilização de outro método de polimerização.

## REFERÊNCIAS

- ALZATE, D. J. G.; PEÑAFIEL, F. C. R.; BINAG, C. A. Polypyrrole on pineapple (Ananas comosus) and water hyacinth (Eichhornia crassipes) polyester blended textiles as promising electrode materials for supercapacitor applications. **Materials Chemistry And Physics**, v. 279, p. 125774, mar. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125774>. Acesso em: 02 nov. 2023.
- BABU, K. F.; SUBRAMANIAN, S.P. S.; KULANDAINATHAN, M. A. Functionalisation of fabrics with conducting polymer for tuning capacitance and fabrication of supercapacitor. **Carbohydrate Polymers**, v. 94, n. 1, p. 487-495, abr. 2013. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.021>. Acesso em: 03 nov. 2023.
- BENVENUTI, E. W. *et al.* Tecidos de Malha Spacer e suas Aplicações Práticas: Uma Revisão Bibliográfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2., 2021. **Anais [...]**: Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, 2021. p. 1-4.
- BIERHALZ, A. C. K. *et al.* Inovações e funcionalidades têxteis. In: AGUIAR, Catia Rosana Lange de *et al.* (org.). **Engenharia Têxtil: uma abordagem simplificada**. Florianópolis: Editora Ufsc, 2022. p. 251-304.
- CECEN, V. *et al.* FTIR and SEM analysis of polyester- and epoxy-based composites manufactured by VARTM process. **Journal Of Applied Polymer Science**, v. 108, n. 4, p. 2163-2170, 5 fev. 2008. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/app.27857>. Acesso em: 04 nov. 2023.
- CHEN *et al.* Preparing Polypyrrole-Coated Stretchable Textile via Low-Temperature Interfacial Polymerization for Highly Sensitive Strain Sensor. **Micromachines**, v. 10, n. 11, p. 788, 17 nov. 2019. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/mi10110788>. Acesso em : 15 set. 2023.
- CHEN, Z.; HAY, J.N.; JENKINS, M.J. FTIR spectroscopic analysis of poly(ethylene terephthalate) on crystallization. **European Polymer Journal**, v. 48, n. 9, p. 1586-1610, set. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2012.06.006>. Acesso em; 04 nov. 2023.
- CHOUDHARY, R. B.; ANSARI, S.; PURTY, B. Robust electrochemical performance of polypyrrole (PPy) and polyindole (PIn) based hybrid electrode materials for supercapacitor application: a review. **Journal Of Energy Storage**, v. 29, p. 101-302, jun. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101302>. Acesso em: 31 ago. 2023.
- CONTRI, G. **Obtenção de Nanocompósitos de Resina Epóxi/Montmorilonita-Polipirrol: Avaliação das Propriedades Físico-Químicas**. 2015. 115 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

DOU, L. *et al.* Weft-Knitted Spacer Fabric for Highly Stretchable–Compressible Strain Sensor, Supercapacitor, and Joule Heater. **Nanomaterials**, v. 12, n. 20, p. 3684, 20 out. 2022. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/nano12203684>. Acesso em: 03 set. 2023.

FERREIRA, A. J. S. *et al.* Malharia. In: AGUIAR, Catia Rosana Lange de *et al* (org.). **Engenharia Têxtil: uma abordagem simplificada**. Florianópolis: Editora Ufsc, 2022. p. 107-130.

FERREIRA, A. J. S.; FERREIRA, F. B. N.; OLIVEIRA, F. R. Têxteis Inteligentes – Uma breve revisão da literatura. **Revista de Design, Inovação e Gestão Estratégica**, v. 5, n. 1, p. 1-22, abr. 2014.

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, 17 set. 2020. Informa UK Limited. Disponível em : <http://dx.doi.org/10.1080/15440478.2020.1821288>. Acesso em: 16 set. 2023.

GRANCARIĆ, A. M. *et al.* Conductive polymers for smart textile applications. **Journal Of Industrial Textiles**, v. 48, n. 3, p. 612-642, 16 mar. 2017. SAGE Publications. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/1528083717699368>. Acesso em: 18 set. 2023.

HONARVAR, M. G.; LATIFI, M. Overview of wearable electronics and smart textiles. **The Journal Of The Textile Institute**, v. 108, n. 4, p. 631-652, jun. 2016. Informa UK Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/00405000.2016.1177870>. Acesso em: 10 set. 2023.

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

LIMA, P. H. C. *et al.* Polímeros Condutores com Propriedades Eletrocromicas: Uma Revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 13, n. 1, p. 1-17, jul. 2018. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewArticle/645>. Acesso em: 28 ago. 2023.

LIN, T. *et al.* Polymerising pyrrole on polyester textiles and controlling the conductivity through coating thickness. **Thin Solid Films**, v. 479, n. 1-2, p. 77-82, maio 2005. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2004.11.146>. Acesso em: 05 set. 2023.

LIN, X. *et al.* Design and construction of 1D/2D/3D fabric-based wearable micro-supercapacitors. **Journal Of Power Sources**, v. 560, p. 232712, mar. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232712>. Acesso em: 4 set. 2023.

LIU, Y. *et al.* Research on the Performance of Polypyrrole Coated Conductive Fabrics Prepared from Different Base Materials. **Fibres & Textiles In Eastern Europe**, v. 31, n. 2, p. 75-81, 1 jul. 2023. Walter de Gruyter GmbH. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2478/ftce-2023-0018>. Acesso em: 15 set. 2023.

MAESTRI, G. **Efeito piezoelétrico em têxteis inteligentes utilizando malhas por trama**. 2022. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2022.

MAESTRI, G. *et al.* Development of a textile multilayered device with piezoelectric property using different knitted fabric structures. **Research Journal Of Textile And Apparel**, p. 1-15, 13 out. 2023. Emerald. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/rjta-04-2023-0047>. Acesso em: 20 out. 2023.

MENDES, B. L. M. **Electronic textiles functionalized with conductive polymers**. 2019. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Master of Science In Micro And Nanotechnologies Engineering, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2019.

MERLINI, Claudia *et al.* Polypyrrole nanoparticles coated amorphous short silica fibers: synthesis and characterization. **Polymer Testing**, v. 31, n. 8, p. 971-977, dez. 2012. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2012.07.003>. Acesso em: 03 set. 2023.

OH, K. W.; PARK, H. J.; KIM, S. H. Stretchable conductive fabric for electrotherapy. **Journal Of Applied Polymer Science**, v. 88, n. 5, p. 1225-1229, 19 fev. 2003. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/app.11783>. Acesso: 10 set. 2023.

RAY, S. C. **Fundamentals and Advances in Knitting Technology**. Nova Delhi: Woodhead Publishing India, 2012. 393 p. (Woodhead Publishing India in Textiles).

RUSSELL, S. J. **Handbook of Nonwovens**. 1ª ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2007. 544 p. (Woodhead Publishing Series in Textiles).

SANKAUSKAITE, A. *et al.* Smart textile with integrated wearable electrochemical sensors. **Current Opinion In Electrochemistry**, v. 42, p. 101410, dez. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coelec.2023.101410>. Acesso em : 25 out. 2023.

SHI, H. H. *et al.* Sustainable electronic textiles towards scalable commercialization. **Nature Materials**, v. 22, n. 11, p. 1294-1303, 27 jul. 2023. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41563-023-01615-z>. Acesso em: 26 set. 2023.

SOIN, N. *et al.* Novel "3-D spacer" all fibre piezoelectric textiles for energy harvesting applications. **Energy Environ. Sci.**, v. 7, n. 5, p. 1670-1679, 2014. Royal Society of Chemistry (RSC). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/c3ee43987a>. Acesso em: 18 set. 2023.

SPENCER, D. **Knitting technology**. Woodhead publishing, 3ª edição, 2001.

STROHMEIER, P. *et al.* Demo of PolySense: how to make electrically functional textiles. **Extended Abstracts Of The 2020 Chi Conference On Human Factors In Computing Systems**, p. 1-4, 25 abr. 2020. ACM. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1145/3334480.3383148>. Acesso em: 05 out. 2023.

STYLIOS, George K.. **Novel Smart Textiles**. *Materials*, v. 13, n. 4, p. 950, 20 fev. 2020. MDPI AG. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13040950>. Acesso em: 31 ago. 2023

WEN, J. *et al.* Wearable technologies enable high-performance textile supercapacitors with flexible, breathable and wearable characteristics for future energy storage. **Energy Storage Materials**, v. 37, p. 94-122, maio 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ensm.2021.02.002>. Acesso em : 22 set. 2023.

XIE, J. *et al.* *In situ* polymerization of polypyrrole on cotton fabrics as flexible electrothermal materials. **Journal Of Engineered Fibers And Fabrics**, v. 14, p. 155892501982744, jan. 2019. SAGE Publications. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/1558925019827447>. Acesso em: 07 out. 2023.

YIP, Joanne; NG, Sun-Pui. Study of three-dimensional spacer fabrics. **Journal Of Materials Processing Technology**, v. 206, n. 1-3, p. 359-364, set. 2008. Elsevier BV. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.073>. Acesso em: 25 ago. 2023.

YU, A. *et al.* Development of fully fashioned knitted spacer fabric bra cup: one-step production from yarn. **Materials & Design**, v. 219, p. 110825, jul. 2022. Elsevier BV. Disponível em; <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110825>. Acesso em: 03 set. 2023.