



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

Gabriela Maestri

Efeito piezoelétrico em têxteis inteligentes utilizando malhas por trama

Blumenau

2022

Gabriela Maestri

Efeito piezoelétrico em têxteis inteligentes utilizando malhas por trama

Defesa submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Fernanda Steffens, Dr.

Coorientador: Prof. Claudia Merlini, Dr. e Leonardo Mejia, Dr.

Blumenau

2022

Ficha de identificação da obra

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

Maestri, Gabriela

Efeito piezoelétrico em têxteis inteligentes utilizando malhas por trama : Defesa submetida ao Programa de Pós graduação em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina. Orientador: Prof. Fernanda Steffens, Dr. Coorientador: Prof. Claudia Merlini, Dr. e Leonardo Mejia, Dr. / Gabriela Maestri ; orientador, Fernanda Steffens, coorientador, Claudia Merlini, coorientador, Leonardo Rincon, 2022.

87 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Têxteis inteligentes. 3. Piezoeletricidade. 4. Malharia por trama. I. Steffens, Fernanda. II. Merlini, Claudia. III. Rincon, Leonardo IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Têxtil. V. Título.

Gabriela Maestri

Efeito piezoelétrico em têxteis inteligentes utilizando malhas por trama

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Silgia Aparecida da Costa, Dr.(a)
Universidade de São Paulo

Prof.(a) Cristiane Costa, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Fernanda Steffens, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

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

Blumenau, 2022.

Este trabalho é dedicado à minha família e a todos os profissionais apaixonados pela ciência e pelo mundo têxtil.

AGRADECIMENTOS

Minha imensa gratidão à UFSC, pela oportunidade de aprender sempre mais, e por me proporcionar experiências tão belas que envolvem a realização de uma pesquisa de mestrado.

À minha família, em especial aos meus pais, Maria e Edson, e ao meu irmão Eder, pelo imenso incentivo na realização deste sonho.

Ao meu namorado Eduardo, por todo o amor e paciência, e por sempre me encorajar neste – e em tantos outros – desafios. Você é incomparável.

À minha orientadora Fernanda, por ter aceitado este desafio comigo! Por ter me ajudado e guiado em todos os momentos e ter sido tão participativa na nossa pesquisa, muito obrigada!

Aos meus coorientadores, Claudia e Leonardo, por terem acreditado em mim no desenvolvimento desta dissertação, e pela imensa contribuição e dedicação com nosso trabalho, além de todo apoio principalmente na realização dos ensaios.

Aos meus colegas de mestrado, colegas de laboratório e de vida!! Que me apoiaram, me ajudaram, me ouviram... vocês são parte desta conquista.

A todos os docentes da UFSC-BNU, por compartilhar tanto conhecimento, experiências, e pela disposição em auxiliar, sempre prezando pelo desenvolvimento da educação e da pesquisa científica. Vocês são meus grandes exemplos.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram positivamente com este trabalho.

A tarefa não é tanto para ver o que ninguém viu ainda, mas pensar o que ninguém ainda pensou, sobre aquilo que todo mundo vê. (SCHOPENHAUER, 1851)

RESUMO

Materiais têxteis inteligentes se diferenciam dos artefatos têxteis convencionais pois possuem a capacidade de alterar suas características a partir de um estímulo externo. A exemplo disto, pode-se mencionar os têxteis com propriedades piezoelétricas. O efeito piezoelétrico se dá pela resposta elétrica a partir de um estímulo mecânico, e vice-versa. A tecnologia de malharia apresenta materiais promissores neste contexto de desenvolvimento, por oferecer características interessantes de leveza, flexibilidade, versatilidade e conforto ao produto, decorrentes da sua geometria de formação. Estudos comparativos analisando a resposta elétrica entre tecidos de malhas e tecidos planos já foram realizados. No entanto, há uma lacuna em termos de pesquisa científica no que se refere a comparação do efeito piezoelétrico em um material contendo diferentes estruturas de malha, analisando sobre a influência do ponto utilizado no desenvolvimento do raporte. Com isso, o objetivo deste trabalho é desenvolver e analisar um dispositivo têxtil comparando seu desempenho piezoelétrico a partir da utilização de duas diferentes estruturas de malha por trama, nomeadamente jersey e piqué. O dispositivo é composto por cinco camadas: uma central de nãotecido de poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF) obtido pela técnica de eletrofiação, envolto entre duas camadas isolantes, neste caso malhas por trama de poliéster (jersey ou piqué); e duas camadas externas condutoras, também de malha por trama de poliéster revestidas com polipirrol a partir da polimerização oxidativa *in situ*, a fim de torná-las malhas condutoras. As camadas foram unidas pelo auxílio de uma máquina de costura. A morfologia analisada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) apresentou um nãotecido de PVDF com característica porosa e filamentos de diâmetro médio em torno de 561 nanômetros, e sua característica de fase β do polímero foi confirmada com auxílio da técnica de FTIR. O dispositivo têxtil desenvolvido foi analisado via MEV, onde pode-se observar as camadas que o constitui, sem estarem conectadas entre si. Esta técnica também permitiu a visualização comparativa das malhas com e sem a adição do polipirrol, destacando a presença de polipirrol incorporado como revestimento nas malhas e por entre e os filamentos de poliéster que as compõem. A partir dos resultados obtidos, observou-se que os dispositivos construídos a partir de malhas jersey obtiveram melhor desempenho piezoelétrico quando submetidos à força aplicada no sentido das carreiras das malhas e à pressão aplicada, apresentando comportamento correlato de curvas de força e tensão, caracterizando a presença do efeito piezoelétrico. Ainda, estas são mais leves e menos espessas do que as amostras contendo a estrutura piqué. Os dispositivos contendo a estrutura piqué apresentaram melhor desempenho piezoelétrico nos ensaios de força aplicada na direção das colunas, devido à presença de laçadas carregadas em sua estrutura de formação, além de serem mais espessas e de maior gramatura. O presente estudo contribuiu positivamente para o avanço de novos desenvolvimentos acerca de materiais têxteis com propriedades piezoelétricas, e confirma a influência dos pontos de malha no raporte no seu desempenho e em sua resposta elétrica.

Palavras-chave: Piezoeletricidade. Têxteis inteligentes. Malharia por trama.

ABSTRACT

Smart textile materials differ from conventional textile products as they can change their characteristics from an external stimulus. As an example of this, it can be mentioned textiles with piezoelectric properties. The piezoelectric effect occurs through the electrical response from a mechanical stimulus, and vice versa. Knitting technology presents promising materials in this development context, as it offers interesting characteristics of lightness, flexibility, versatility, and comfort to the product, resulting from its forming geometry. Comparative studies analyzing the electrical response between knitted fabrics and woven fabrics have already been carried out. However, there is a gap in terms of scientific research regarding the comparison of the piezoelectric effect in a material containing different knitted fabric structures, analyzing the influence of the point used in the development of the rapporteur. With that, the aim of this work is to develop and analyze a textile device comparing its piezoelectric performance from the use of two different weft knitted fabrics structures, namely jersey and pique. The device is made up of five layers: a core of poly (vinylidene fluoride) (PVDF) nonwoven fabric obtained by the electrospinning technique, wrapped between two insulating layers, in this case knitted with polyester weft (jersey or pique); and two conductive outer layers, also made of polyester weft knitted fabric coated with polypyrrole from in situ oxidative polymerization, to make them conductive knitted fabrics. The layers were joined using a sewing machine. The morphology analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM) showed a PVDF nonwoven with porous characteristic and filaments with an average diameter of around 561 nanometers, and its β -phase characteristic of the polymer was confirmed with the aid of the FTIR technique. The textile device developed was analyzed via SEM, where the layers that constitute it can be observed, without being connected to each other. This technique also allowed the comparative visualization of the knitted fabrics with and without the addition of polypyrrole, highlighting the presence of polypyrrole incorporated as a coating in the knitted fabrics and between and the polyester filaments that make up the knitted fabrics by plot. From the results obtained, it was observed that the devices constructed from jersey knitted fabrics obtained better piezoelectric performance when subjected to the applied force in the direction of the knitting courses and to the applied pressure, presenting a correlated behavior of force and tension curves, characterizing the presence of the piezoelectric effect. Furthermore, these are lighter and thinner than samples containing the pique structure. The devices containing the pique structure presented better piezoelectric performance in the tests of applied force in the direction of the wales, due to the presence of loaded loops in its formation structure, besides being thicker and of greater weight. The present study has contributed positively to the advancement of new developments about textile materials with piezoelectric properties and confirms the influence of knitted fabric points in rapport on its performance and on its electrical response.

Keywords: Piezoelectricity. Smart textiles. Weft knitted fabric.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo do desenvolvimento de têxteis inteligentes.	20
Figura 3 – Efeito piezoelétrico no cristal quartzo.....	25
Figura 4 – Representação esquemática do efeito piezoelétrico em polímeros eletroativos.	26
Figura 5 – Composição esquemática de um dispositivo têxtil piezoelétrico.....	30
Figura 6 – Conformações α , β e γ do PVDF.	32
Figura 7 – Estrutura química do polímero PPy.	34
Figura 8 – Identificação de carreira e coluna em estrutura de malha.	35
Figura 9 – Tipos de pontos na malharia por trama: normal, carregado e flutuante.....	36
Figura 10 – Identificação da altura e comprimento da laçada.	37
Figura 11 – Diagrama esquemático do processo de eletrofiação a) na horizontal; b) na vertical. 38	
Figura 12 – Tear retilíneo de malha por trama.	41
Figura 13 – Raportes jersey e piqué.	42
Figura 14 – Esquema ilustrativo do processo de polimerização oxidativa <i>in situ</i> do pirrol nas amostras de malha.	43
Figura 15 – Aparato de eletrofiação.	44
Figura 16 – Esquema ilustrativo do processo de construção do dispositivo têxtil piezoelétrico. 45	
Figura 17 – Equipamento <i>Maillimeter</i>	46
Figura 18 – Método de ensaio de força <i>versus</i> diferença de potencial.....	50
Figura 19 – Construção das malhas de PES por trama em tear retilíneo.....	51
Figura 20 – FTIR das malhas de poliéster.	54
Figura 21 – Processo de polimerização <i>in situ</i> do pirrol nas amostras de malha.	55
Figura 22 – MEV das malhas. a) sem polipirrol; b) com polipirrol.	56
Figura 23 – MEV das malhas jersey (a) e (c) sem PPy; b) (b) e (d) com PPy; d) ampliação de 2000x com PPy.....	57
Figura 24 – MEV do não-tecido de PVDF.	60
Figura 25 – FTIR do não-tecido de PVDF.....	61
Figura 26 – Análise de DSC do não-tecido de PVDF.	62
Figura 27 – Processo de construção do dispositivo têxtil piezoelétrico.	63
Figura 28 – MEV do dispositivo têxtil piezoelétrico.	65

Figura 29 – Dispositivo jersey com força aplicada na direção das carreiras.....	66
Figura 31 – Jersey com pressão aplicada.....	67
Figura 32 – Piqué com força aplicada na direção das carreiras.....	68
Figura 33 – Piqué com força aplicada na direção das colunas.	68
Figura 34 – Piqué com pressão aplicada.	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais áreas de atuação de têxteis inteligentes.	22
Quadro 2 – Breve revisão de trabalhos correlatos sobre dispositivos piezoelétricos.....	28
Quadro 3 – Principais diferenças entre malharia por trama e por urdume.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comprimento de laçada das amostras de malha de PES	51
Tabela 2 – Espessura das amostras de malha de PES.....	52
Tabela 3 – Gramatura das amostras de malha de PES	53
Tabela 4 – Densidade das malhas jersey e piqué	53
Tabela 5 – Espessura das malhas com polipirrol.....	58
Tabela 6 – Gramatura das malhas com polipirrol.....	58
Tabela 7 – Diferença de massa após processo de polimerização	59
Tabela 8 – Espessura do dispositivo têxtil piezoelétrico	63
Tabela 9 – Gramatura do dispositivo têxtil piezoelétrico.....	64
Tabela 10 – Valores médios da diferença de potencial de amostras com propriedade piezoelétrica.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BaTiO ₃	Titanato de bário
CdSe	Seleneto de cádmio
DMAc	Dimetilacetamida
FC	Fator de cobertura
FeCl ₃	Cloreto férrico
JCR	Journal Citation Report
K ₂ CO ₃	Carbonato de potássio
KNbO ₃	Niobato de potássio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NaNbO ₃	Niobato de sódio
NBR	Norma Técnica Brasileira
PbTiO ₃	Titanato de chumbo
PDMS	Polidimetilsiloxano
PES	Poliéster
PIC	Polímero intrinsecamente condutor
PLGA	Poli ácido láctico-co-ácido glicólico
PLLA	Poli ácido L-láctico
PP	Polipropileno
PPy	Polipirrol
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloreto de vinila
PVDF	Poli(fluoreto de vinilideno)
PVDF-TrFE	Poli(fluoreto de vinilideno-trifluoretileno)
PZT	Titanato zirconato de chumbo
Te	Telúrio
TENGs	Nanogeradores Triboelétricos
TiO ₂	Dióxido de titânio
ZnO	Óxido de zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

σ condutividade eléctrica

β conformação beta

α conformação alfa

γ conformação sigma

ρ resistividade eléctrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	ESTADO DA ARTE	19
2.1	TÊXTEIS INTELIGENTES	19
2.2	O EFEITO PIEZOELÉTRICO	24
2.3	MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS.....	27
2.3.1	Materiais têxteis piezoelétricos	29
2.4	POLÍMEROS COM PROPRIEDADE PIEZOELÉTRICA	31
2.5	POLÍMEROS INTRINSECAMENTE CONDUTORES	33
2.6	TECNOLOGIA DE MALHARIA.....	34
2.6.1	Tecnologia de malharia por trama.....	35
2.7	TÉCNICA DE ELETROFIAÇÃO	37
3	METODOLOGIA.....	40
3.1	MATERIAIS.....	40
3.2	MÉTODOS	40
3.2.1	Desenvolvimento de malhas de PES por trama	40
3.2.2	Polimerização <i>in situ</i> do pirrol nas amostras de malha.....	42
3.2.3	Desenvolvimento de não tecidos de PVDF por eletrofiação.....	43
3.2.4	Construção do dispositivo têxtil piezoelétrico	44
3.3	CARACTERIZAÇÕES	45
3.3.1	Comprimento de laçada das malhas	46
3.3.2	Espessura das malhas	46
3.3.3	Fator de cobertura	46

3.3.4	Gramatura.....	47
3.3.5	Densidade	47
3.3.6	Espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	47
3.3.7	Resistividade elétrica pelo método 4 pontas.....	48
3.3.8	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	48
3.3.9	Calorimetria exploratória diferencial (DSC)	49
3.3.10	Ensaio de piezoelectricidade utilizando galvanômetro e sensor de força	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1	DESENVOLVIMENTO DE MALHAS DE PES POR TRAMA	51
4.2	POLIMERIZAÇÃO <i>IN SITU</i> DO PIRROL NAS AMOSTRAS DE MALHA	55
4.3	DESENVOLVIMENTO DE NÃOTECIDO DE PVDF POR ELETROFIAÇÃO	59
4.4	CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO TÊXTIL PIEZOELÉTRICO	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
6	TRABALHOS FUTUROS	74
	REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

Os têxteis técnicos são definidos como “materiais e produtos fabricados principalmente para suas propriedades e características técnicas, ao invés de características estéticas e/ou decorativas”, e são classificados de acordo com as tecnologias de desenvolvimento que os compõem. Na grande área de têxteis técnicos, encontram-se as tecnologias relacionadas à tecidos, fibras/filamentos/fios, nanotecnologia, *coatings*, compósitos e os têxteis inteligentes (AHMAD; RASHEED; NAWAB, 2020).

Os têxteis inteligentes se diferenciam dos artefatos têxteis convencionais pois possuem a capacidade de alterar suas propriedades a partir de um estímulo externo. A exemplo disto, pode-se mencionar os têxteis com propriedade de conforto térmico, que regulam a temperatura corporal de acordo com a temperatura externa (estímulo externo) (FAROOQ; ZHANG, 2021; FARUK et al., 2021): os materiais crômicos, que podem ser fotocrômicos, eletrocromicos, termocrômicos, solvato-crômicos, entre outros (alterando sua cor com um estímulo externo) (GAUCHE et al., 2020; RAMLOW; ANDRADE; IMMICH, 2021); materiais têxteis com memória de forma (ABAVISANI; REZAIFAR; KHEYRODDIN, 2021); autolimpantes, antimicrobianos, antichama, proteção ultravioleta, hidrofóbicos e repelentes à água e curativos que liberam fármacos de maneira controlada (AKBAR SHAH et al., 2022), por exemplo.

O campo de estudo e desenvolvimento de têxteis inteligentes é vasto, e já ocupa espaços nas áreas da saúde e medicina, transportes, segurança, construção civil e arquitetura, esportes, eletrônicos, entre outros (CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012; KONCAR, 2016; PROVIN et al., 2021; WU et al., 2020b).

Dentre as áreas mencionadas, destaca-se o desenvolvimento de materiais têxteis piezoelétricos, classificados como têxteis eletrônicos (ou *e-textiles*). A piezoelectricidade é definida como a capacidade de transformar tensão mecânica aplicada em carga elétrica, e vice-versa (CHAKHCHAOUÏ et al., 2019). Os materiais têxteis com propriedade piezoelétrica podem ser obtidos na forma de filamentos, estruturas de tecido plano, estruturas de malha, não tecidos, compósitos, entre outros substratos (AQUINO et al., 2021; LIU et al., 2020).

As estruturas têxteis construídas pela tecnologia de malharia por trama podem atuar em áreas técnicas bem como na produção de têxteis inteligentes. Este método apresenta a tricotagem dos fios na forma de laçadas na direção longitudinal e várias são as possibilidades de raportes de malha (menor representação gráfica para formar a estrutura), permitindo,

inclusive a utilização de diferentes tipos de fios, promovendo um material leve, flexível e confortável (HE et al., 2021; JIANG et al., 2021; WEN et al., 2021).

Além disso, tecnologias inovadoras com propriedade piezoelétrica já foram desenvolvidas utilizando-se estruturas de malha, podendo-se mencionar: tecidos de malha para monitoramento de condições humanas (ZHOU et al., 2021), tecidos de malha tridimensionais como reforços em estruturas de concreto (DELAVARI; DABIRYAN, 2021) e nanogeradores triboelétricos (TENGs) utilizando malhas em sua construção (CHEN et al., 2020).

As estruturas piezoelétricas provenientes de materiais têxteis são geralmente construídas em camadas, devido à necessidade de se ter materiais condutores nas extremidades, e poliméricos isolantes entre a camada condutora e a piezoelétrica, e um material com características piezoelétricas no centro (HUANG et al., 2015; YANG et al., 2017).

Para a obtenção de uma camada condutora elétrica, o polímero polipirrol (PPy) é mencionado como alternativa para esta aplicação por ser um polímero intrinsecamente condutor, que apresenta condutividade elétrica de 600 S. cm^{-1} , maior do que outros polímeros condutores como o politiofeno (condutividade 200 S.cm^{-1}), o poli(p-fenileno) (condutividade 500 S.cm^{-1}) e o poli(p-fenileno vinileno) (condutividade 1 S.cm^{-1}), por exemplo (J. LOPES DA SILVA; V. SÁ DA COSTA; A. M. FREIRE, 1986). O PPy é geralmente utilizado como eletrodo em baterias, dispositivos eletrônicos, sensores, capacitores, entre outros (WYPYCH, 2012).

Um polímero sintético semi-cristalino que se destaca por sua propriedade piezoelétrica é o poli (fluoreto de vinilideno) (PVDF). A característica piezoelétrica do PVDF é estimulada ainda mais na sua fase β , ou seja, quando as cadeias poliméricas ($-\text{CH}_2\text{-CF}_2-$) estão alinhadas na conformação *trans* (LIU et al., 2021). De acordo com estudos anteriores reportados por Merlini et. al. (2014) a eletrofiação permite obter uma membrana fibrosa de PVDF – ou não tecido, com a presença da fase β (MERLINI et al., 2014a). O PVDF é um polímero de cor branca, inodoro, que possui cristalinidade entre de 35-70%, densidade $1,78 \text{ g.cm}^{-3}$ e é atóxico (ABREU, 2012; HERNÁNDEZ-NAVARRO et al., 2016; MERLINI et al., 2014b). Suas principais aplicações são direcionadas a capacitores, cabos, filtração, membranas e válvulas (WYPYCH, 2012).

Diversos estudos acerca de materiais têxteis piezoelétricos vêm sendo desenvolvidos, como por exemplo, não tecidos para aplicação em palmilhas e luvas, tecidos atuando como cortinas e toldos externos, não tecidos para captação de energia por meio da vibração de som (HUANG et al., 2015; HWANG; CHOI; KIM, 2019; JALIL, 2020; KHAN et al., 2018).

Neste âmbito, encontram-se estudos acerca do tema supracitado avaliando a alteração da resposta elétrica do material piezoelétrico, quando em diferentes materiais condutores e/ou piezoelétricos. Guo et. al. (2018) relatam a comparação entre nano geradores baseados em têxteis e nano geradores híbridos triboelétricos-piezoelétricos (GUO et al., 2018). Proto et. al. (2017) mencionam diferentes estudos sobre materiais piezoelétricos como nanogeradores, comparando o uso de diferentes eletrodos (condutores), bem como prata, alumínio, ouro, grafeno, carbono e cobre (PROTO et al., 2017). Os diferentes resultados de condutividade elétrica de distintos materiais, bem como carbono, nanotubos de carbono e grafeno, foram relatados por Lund et al. (2018) para aplicações em têxteis piezoelétricos (LUND et al., 2018).

Ainda, há estudos alterando o material piezoelétrico, comparando diferentes polímeros e blendas poliméricas a fim de avaliar as diferenças na resposta elétrica do dispositivo piezoelétrico. Proto et al. (2017) relataram investigações utilizando filmes de óxido de zinco (ZnO), obtendo tensões de 0,2 V, 0,28 V e 1,0 V, compósitos de PVDF contendo ZnO, com resultados de 0,33 V, filme de PVDF com tensão de 25 V, compósitos utilizando poliamida 6 e poli(tetrafluoretileno) (PTFE) com resultados de 5 V, entre outros (PROTO et al., 2017).

O estudo de Lund et. al. (2018) abrange os diferentes resultados de condutividade elétrica de têxteis com propriedades piezoelétricas, por meio de tecnologias têxteis distintas, como a fiação por fusão de materiais como polipropileno e polietileno, e fiação à úmido de poliuretano e celulose, além de comparar tecidos planos com tecidos de malha (LUND et al., 2018).

Todavia, não se encontra na literatura trabalhos focados na avaliação da resposta elétrica de um material piezoelétrico confrontando diferentes estruturas têxteis, partindo da mesma tecnologia de formação, nesse caso, de tricotagem. Ou seja, alterando os tipos de ponto na construção das malhas, por exemplo, dando origem a outros raportes. Dessa forma, encontra-se uma oportunidade para estudar as influências na resposta elétrica decorrentes de diferentes estruturas têxteis.

Com isso, o presente estudo tem por principal objetivo desenvolver e analisar, comparativamente, o comportamento piezoelétrico em dispositivos construídos a partir de diferentes estruturas de malha por trama (jersey e piqué) contendo não tecidos eletrofiados de PVDF e malhas por trama revestidas com PPy, capazes de gerar energia elétrica a partir do movimento (tensão mecânica). A comparação de distintos entrelaçamentos de malha por trama para a aplicação piezoelétrica ainda é uma lacuna a ser preenchida cientificamente.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos gerais e específicos para a execução da presente dissertação de mestrado.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da presente dissertação é avaliar comparativamente o efeito piezoelétrico de dispositivos têxteis desenvolvidos por duas diferentes estruturas de malha por trama (distintas combinações de ponto para a formação do raporte).

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- a) obter o nãotecido de PVDF por eletrofiação e analisar sua fase β ;
- b) produzir as malhas por trama (jersey e piqué) utilizando filamentos de poliéster (PES) em tear retilíneo;
- c) avaliar a condutividade elétrica das amostras de malha por trama revestidas com polipirrol;
- d) avaliar as características morfológicas das partes que compõem o dispositivo têxtil piezoelétrico desenvolvido;
- e) analisar o efeito piezoelétrico das amostras com auxílio de galvanômetro, comparando o efeito das estruturas de malha sobre o efeito da piezoeletricidade.

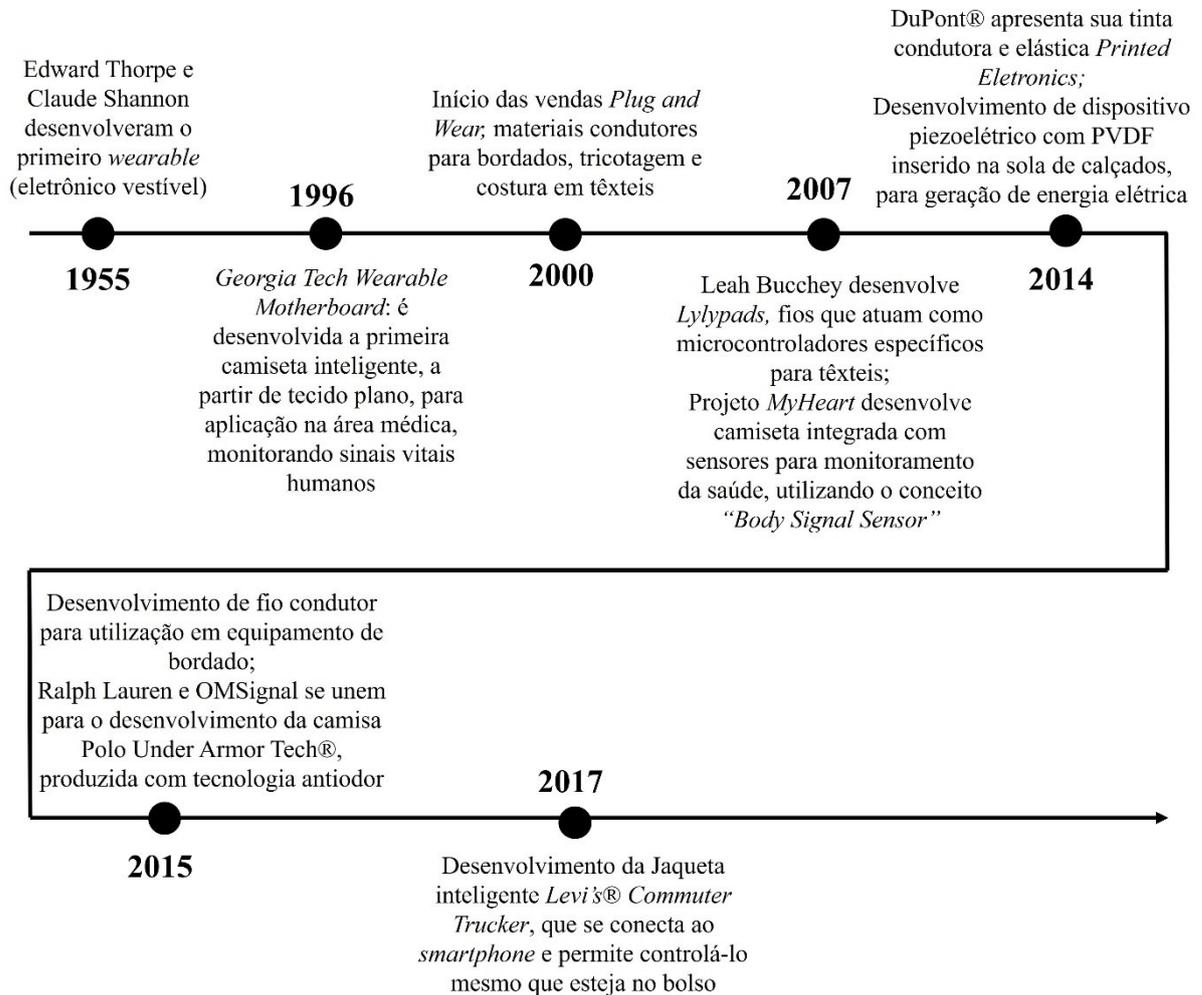
2 ESTADO DA ARTE

Nesta seção será descrita a fundamentação teórica do presente estudo, partindo dos têxteis inteligentes, seguido da tecnologia de malharia por trama, propriedade piezoelétrica, materiais piezoelétricos e método de eletrofiação.

2.1 TÊXTEIS INTELIGENTES

Os têxteis inteligentes são materiais desenvolvidos com alguma funcionalidade pré-determinada. Esta funcionalidade pode ser um têxtil convencional (não inteligente) contendo um aditivo inteligente específico, como por exemplo uma camiseta com uma estampa capaz de alterar sua cor conforme altera-se a temperatura do meio externo (propriedade termocrômica). Ainda, um material pode ser desenvolvido com características intrinsecamente inteligentes, bem como a partir da utilização de fios condutores no vestuário para monitoramento de condições humanas (KARPPINEN; KALLUNKI; KOMULAINEN, 2019; KONGAHAGE; FOROUGH, 2019; STYLIOS, 2020). Assim, materiais têxteis inteligentes são caracterizados como aqueles que atuam respondendo a um estímulo externo (ROACH et al., 2019), que pode ser: mudança de temperatura, alteração de pH, ação mecânica, interação química, entre outros (CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012; KONGAHAGE; FOROUGH, 2019; SINGHA; KUMAR; PANDIT, 2019). Uma linha do tempo com os principais desenvolvimentos acerca de materiais têxteis inteligentes é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Linha do tempo do desenvolvimento de têxteis inteligentes.



Fonte: Adaptado de (CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012; VAGOTT; PARACHURU, 2018)

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 têxtil 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 à estas, e ainda se adaptar às condições desejadas (KONGAHAGE; FOROUGH, 2019). A Figura 2 ilustra as três categorias, sinalizando sua complexidade,

necessidade de interação com o ambiente e exemplos de aplicação, conforme Kongahage e Foroughi (2019) (KONGAHAGE; FOROUGH, 2019).

Figura 2 – Classificação dos materiais têxteis inteligentes.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O desenvolvimento de têxteis inteligentes pode se dar por intermédio de tecnologias têxteis convencionais, tais como a tecelagem plana (CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012; KONGAHAGE; FOROUGH, 2019); processos de malharia (CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012; KONGAHAGE; FOROUGH, 2019); bordado (CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012; EWA KORZENIEWSKA, ANDRZEJ KRAWCZYK, JÓZEF MRÓZ; ZAWISLAK, 2020; KONGAHAGE; FOROUGH, 2019; STYLIOS, 2020); estamparia (CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012); beneficiamento e na utilização de fibras diferenciadas com características funcionais (condutoras) (CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012; STYLIOS, 2020). O Quadro 1 apresenta as principais áreas de atuação de têxteis inteligentes, com uma breve explanação referente às aplicações.

Quadro 1 – Principais áreas de atuação de têxteis inteligentes.

Área	Descrição e principais aplicações	Referência
Medicina/saúde	As aplicações estão ligadas a terapias fotodinâmicas, eletroterapia (alívio de dor, estímulo de contrações musculares), bandagens, suturas e curativos. Inserção de sensores e atuadores são capazes de controlar e/ou monitorar o corpo humano, chamados de têxteis eletro-condutores. As tecnologias de produção destes materiais podem se dar a partir de técnicas convencionais (malharia e tecelagem, porém geralmente <i>Jacquard</i>). Pode-se inserir fios condutores também pela técnica de bordado ou estampa (com tintas condutoras), que podem monitorar/detectar parâmetros fisiológicos como respiração, batimentos cardíacos, postura, pressão sanguínea, temperatura interna corpórea, temperatura da pele, músculos artificiais, entre outros.	(CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012; EWA KORZENIEWSKA, ANDRZEJ KRAWCZYK, JÓZEF MRÓZ; ZAWISLAK, 2020; KONCAR, 2016; KONGAHAGE; FOROUGH, 2019; ROACH et al., 2019; STYLIOU, 2020)
Transportes	Os materiais têxteis inteligentes são grandes aliados nesta área, principalmente pela capacidade de diminuição da massa do veículo, bem como por proporcionar melhoria das suas propriedades, atuando no monitoramento por meio de sensores, comunicando em tempo real sobre qualquer alteração que ocorra durante o trajeto. Ainda, oferecem vantagem em relação à captação de energia, como por exemplo o uso de baterias flexíveis, fios piezoelétricos e células fotovoltaicas flexíveis. A área automotiva relacionada aos materiais têxteis possui inúmeras possibilidades de aplicação, como no teto, carpetes, cinto de segurança, <i>airbag</i> , revestimentos internos das	(CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012; KONCAR, 2016)

Área	Descrição e principais aplicações	Referência
	portas até em filtros. Os têxteis inteligentes podem promover, por exemplo, a temperatura ideal para os assentos.	
Proteção e segurança	As aplicações mais comuns nesta área são uniformes antichamas para bombeiros, equipamentos de proteção com fibras de elevado desempenho para militares, vestuário de proteção balística e com proteção solar.	(KONCAR, 2016)
Têxteis lares	Os “ <i>home textiles</i> ”, como também chamados, comportam uma classe de têxteis inteligentes que abrange têxteis para cama, como cobertores com propriedades de isolamento térmico avançadas. Ainda, estão inseridos nesta classe as roupas de cama, tapetes, cortinas, almofadas, revestimentos, toalhas de mesa, guardanapos, toalhas de banho, entre outros. Desenvolvimentos de têxteis lares com características especiais de durabilidade (principalmente resistência à abrasão), antichamas, autolimpantes e antimicrobianas estão sendo estudadas.	(CARVALHO; FERNANDES; FANGUEIRO, 2017; CHERENACK; VAN PIETERSON, 2012; DAS, 2011)
Geotêxteis	Os materiais classificados como geotêxteis, atuam em contato com solo, pedras e/ou outras camadas dos chamados “geossintéticos”, bem como mantas de proteção, membranas, compósitos, entre outros. Os geotêxteis podem atuar na separação, filtração, drenagem, reforços, estabilização, barreiras e proteção à erosão. A maioria dos geotêxteis são de origem sintética, podendo destacar as famílias de poliolefinas, poliamidas e poliésteres como principais matérias-primas.	(WU et al., 2020a)
Eletrônicos	Os materiais têxteis podem servir como carregadores flexíveis e elásticos de sistemas eletrônicos. Os têxteis	(KONCAR, 2016;

Área	Descrição e principais aplicações	Referência
	inteligentes como eletrônicos podem atuar de diversas formas, dependendo da aplicação. Por exemplo, para um dielétrico elastomérico, aplica-se uma voltagem ao material, as forças de atração e repulsão entre as cargas geram um <i>stress</i> dielétrico, que causa compressão e alongação do material. Os materiais têxteis são interessantes neste tipo de aplicação pois permitem uma quantidade de compressão e alongamento elevadas, sem deformar o material, obtendo um produto com um maior ciclo de vida útil.	SCHISCHKE; NISSEN; SCHNEIDER-RAMELOW, 2020; STYLIOS, 2020)
Esportes	Os têxteis com características inteligentes desenvolvidos para a área esportiva possuem o intuito de auxiliar o atleta a elevar seu desempenho durante a prática, ou ainda, monitorar e controlar condições humanas simultaneamente a atividade. Pesquisas em torno deste campo comportam dispositivos que atuam como termorreguladores inserido no vestuário, com o objetivo de promover uma adequação da temperatura corpórea do atleta durante um determinado esporte.	(YIN et al., 2019)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Economicamente, o mercado de vestuário/tecidos inteligentes está contribuindo positivamente no mundo todo, e estima-se que em 2025 o mercado global desta área será em torno de USD 5,55 bilhões (STYLIOS, 2020).

2.2 O EFEITO PIEZOELÉTRICO

O efeito piezoelétrico foi descoberto pelos irmãos Pierre e Jacques Curie na França, em 1880. Os cientistas observaram a piezoeletricidade em cristais naturais e mais tarde, em 1910, foi publicado o livro de *Woldemar Voigt Lehrbuch der Kristallphysik*, que descreve 20 classes de cristais naturais com atividade piezoelétrica (LU et al., 2020a). O feito foi marcado

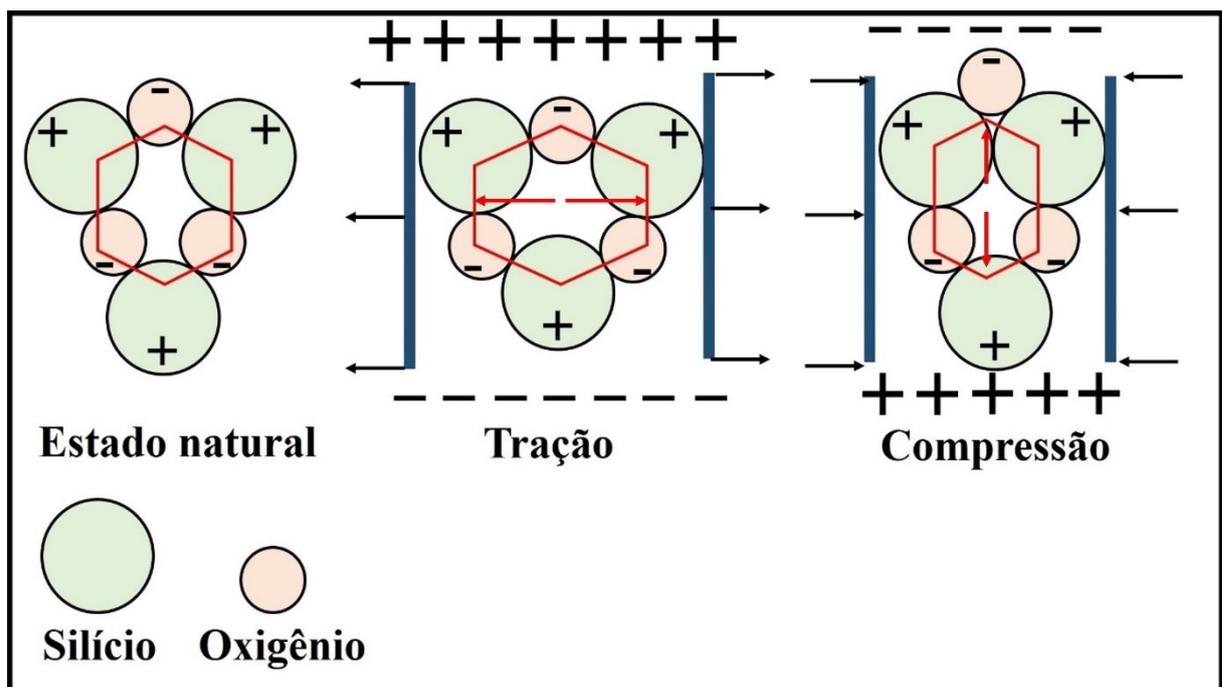
a partir da publicação com a seguinte frase: “*Nós encontramos um novo método para o desenvolvimento de polos de eletricidade nestes mesmos cristais, consistindo em sujeitá-los às variações de pressão ao longos de seus eixos hemiédricos*” (ERTURK; INMAN, 2011).

Os cristais piezoelétricos recebem esta denominação por possuírem a capacidade de converter energia mecânica em energia elétrica e vice-versa, por meio de estímulo externo. Este fato se dá devido à sua estrutura cristalina central assimétrica (LU et al., 2020a; WU et al., 2015). Alguns cristais piezoelétricos naturais são: turmalina, topázio e quartzo (A.C. LOPES; S. LANCEROS-MENDEZ, 2014).

O efeito piezoelétrico em materiais poliméricos é o mesmo do encontrado em cristais naturais, ou seja, se a célula não está comprimida e nem distendida (encontra-se em seu estado normal, sem nenhuma força externa atuando), o centro das cargas positivas e negativas coincide. Mas, se este apresentar uma compressão, ocorre uma separação de cargas, resultando na geração de um dipolo elétrico. Se o material for comprimido em direções opostas, o dipolo formado em cada célula também possuirá orientação oposta (A.C. LOPES; S. LANCEROS-MENDEZ, 2014).

A Figura 3 apresenta a polarização do cristal ao ser estimulado à tração e compressão (setas na horizontal), e o hexaedro ao centro, ilustra a movimentação na estrutura do cristal, quando aplicadas as forças de tração e compressão.

Figura 3 – Efeito piezoelétrico no cristal quartzo.



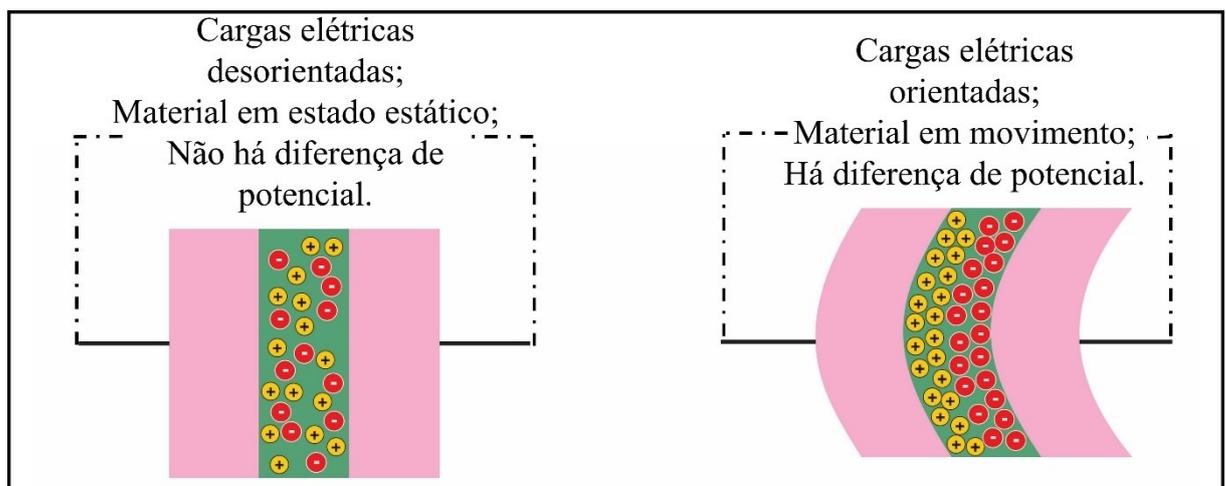
Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A piezoelectricidade é a resposta elétrica a um estímulo mecânico, que pode ser uma tração ou compressão mecânica em um dado material (HUANG et al., 2015; YANG et al., 2017), que pode ser oriundo de diversas fontes, como a partir de ondas do mar, vibrações (THIERRY; MESNIL; CHRONOPOULOS, 2020), pressão (ZHANG et al., 2015a), movimentos do corpo humano (ZHANG et al., 2015b) e vento (ALI; ASHRAF; TAYYABA, 2019), por exemplo. Em outras palavras, a piezoelectricidade é a capacidade de gerar tensão elétrica por resposta proveniente de uma pressão mecânica, ou seja, de produzir eletricidade por meio de compressão em determinados materiais (GHOSH et al., 2017; GHOSH; MANDAL, 2018; KIM et al., 2018).

A propriedade piezoelétrica tem atraído a atenção de pesquisadores pois é uma forma prática de se aproveitar os estímulos mecânicos do meio externo (ambiente) e convertê-los em eletricidade (LI et al., 2020; ZHANG et al., 2015b). Este mecanismo possui capacidade de detecção de transientes e elevada sensibilidade (YANG et al., 2017).

A fim de promover ainda mais sensibilidade ao material piezoelétrico, a melhor escolha para a matéria-prima é a utilização de polímeros (PROTO et al., 2017), em decorrência de suas características de baixa densidade (HE et al., 2019), flexibilidade, fácil processamento, boa compatibilidade e alongamento (WANG et al., 2018).

Figura 4 – Representação esquemática do efeito piezoelétrico em polímeros eletroativos.



Fonte: Adaptado de (A.C. LOPES; S. LANCEROS-MENDEZ, 2014)

Os resultados piezoelétricos dependem, principalmente, do ângulo no qual o material se movimenta, da capacidade piezoelétrica da matéria-prima utilizada, que estão altamente relacionados à leveza e flexibilidade do material desenvolvido (ANDO et al., 2019) e da polarização macroscópica aplicada ao material (ZHU et al., 2018).

2.3 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Os materiais piezoelétricos mais encontrados na natureza são os cristais de quartzo, ZnO e titanato zirconato de chumbo (PZT) (SILVA, 2018). Outros materiais com propriedade piezoelétrica como titanato de bário (BaTiO_3) e titanato de chumbo (PbTiO_3) também já foram descobertos (SOUSA et al., 2018). Atualmente, existe uma grande busca por materiais piezoelétricos mais flexíveis, para que se possa gerar uma quantidade superior de energia decorrente de uma maior deformação, além de uma tentativa de viabilizar a utilização desses materiais no uso cotidiano (CANCIO; GHISSONI, 2013).

O interesse na pesquisa e desenvolvimento de têxteis inteligentes piezoelétricos se encontra em ascensão, principalmente pela sua capacidade de se inserir em diferentes segmentos, tais como a área automobilística, médica e biomédica (BADARAEV et al., 2020; JESIONEK et al., 2019), esportes, aviação, robótica (KHAN et al., 2018; PONNAMMA et al., 2019), vestuário, proteção (HARITO et al., 2020; JI; CHO; YUN, 2019; ROUNDY; TROLIER-MCKINSTRY, 2018), construção civil (FENG; OU, 2018; HOFMANN et al., 2019; JUNG; CHANG, 2019), calçados e acessórios (ZHANG; CHEN; GUO, 2019) e aeroespacial (ANDREADES; MAHMOODI; CIAMPA, 2018).

Um exemplo de material piezoelétrico baseado em têxteis para aplicação na área médica é um sensor que monitora a postura do paciente, a partir da detecção dos movimentos do corpo, como dobrar joelhos e virar os quadris, e transfere as medições para um computador utilizando a tecnologia *bluetooth*. Os autores desenvolveram um programa para detectar a posição do paciente através destes sinais elétricos emitidos pelo corpo do utilizador, e obtiveram 88% de sucesso em ensaios realizados com humanos (CHA; NAM; KIM, 2017).

Os polímeros com propriedade piezoelétrica são também conhecidos como polímeros eletroativos, e foram descobertos anos depois dos cristais piezoelétricos. Esta observação se deu nos polímeros *nylon-11* (ou poliamida 11), poli (ácido láctico) (PLLA), poli (ácido láctico-co-glicólico) (PLGA) e PVDF. De todos os polímeros com propriedade piezoelétrica, o PVDF

e seus copolímeros possuem a maior resposta piezoelétrica (A.C. LOPES; S. LANCEROS-MENDEZ, 2014).

Ainda, pode-se mencionar a utilização dos polímeros piezoelétricos atuando como sensores e atuadores, músculos artificiais e próteses (A.C. LOPES; S. LANCEROS-MENDEZ, 2014). O Quadro 2 exemplifica algumas áreas de aplicação de dispositivos piezoelétricos têxteis, composição do material utilizado, sua localização geralmente desejada e os principais resultados de alguns trabalhos correlatos.

Quadro 2 – Breve revisão de trabalhos correlatos sobre dispositivos piezoelétricos.

Área de aplicação	Material piezoelétrico utilizado	Localização desejada do dispositivo	Principais resultados	Referência
Energia	PVDF	Palmilha/sola dos pés	Tensão máxima de saída gerada pelo dispositivo foi de 60 V a uma frequência de 1 Hz	(HUANG et al., 2015)
Sensores para vestuário	Policloreto de vinila (PVC) / dióxido de titânio (TiO ₂) / carbonato de potássio (K ₂ CO ₃)	Cotovelo	Tensão obtida de 1.9 V	(ZHANG et al., 2015b)
Arquitetura	Poli(tetrafluoretileno) (PTFE)	Cortina	Toldos para captação de energia por meio do movimento do vento	(JALIL, 2020)
Robótica	PVC e BaTiO ₃	Luvas	Voltagem de 0.9 V	(ZHANG et al., 2015a)

Área de aplicação	Material piezoelétrico utilizado	Localização desejada do dispositivo	Principais resultados	Referência
Construção civil	PVDF	Dispositivo para detecção de falhas e/ou ruídos	A carga do sensor polarizado é o dobro que aquele não polarizado	(HOFMANN et al., 2019)
<i>Wearable</i>	Poli (fluoreto de vinilideno-trifluoretileno) (PVDF-TrFE)	Dedos, cotovelos, joelhos e solado de calçados durante prática esportiva	Tensão obtida de 2.1 V para a luva, 0.7 V para a palmilha, 1.1 V para o cotovelo	(JI; CHO; YUN, 2019)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Ainda, o efeito piezoelétrico pode apresentar outros atributos inteligentes, ou seja, combinar outras funcionalidades. Conforme estudos de Ando et al. (2019), um tecido piezoelétrico de PLLA apresentou propriedades bactericidas quando submetido à ensaios de cultivo de bactérias, permanecendo este efeito no momento em que foi sujeito à carga elétrica (ANDO et al., 2019).

2.3.1 Materiais têxteis piezoelétricos

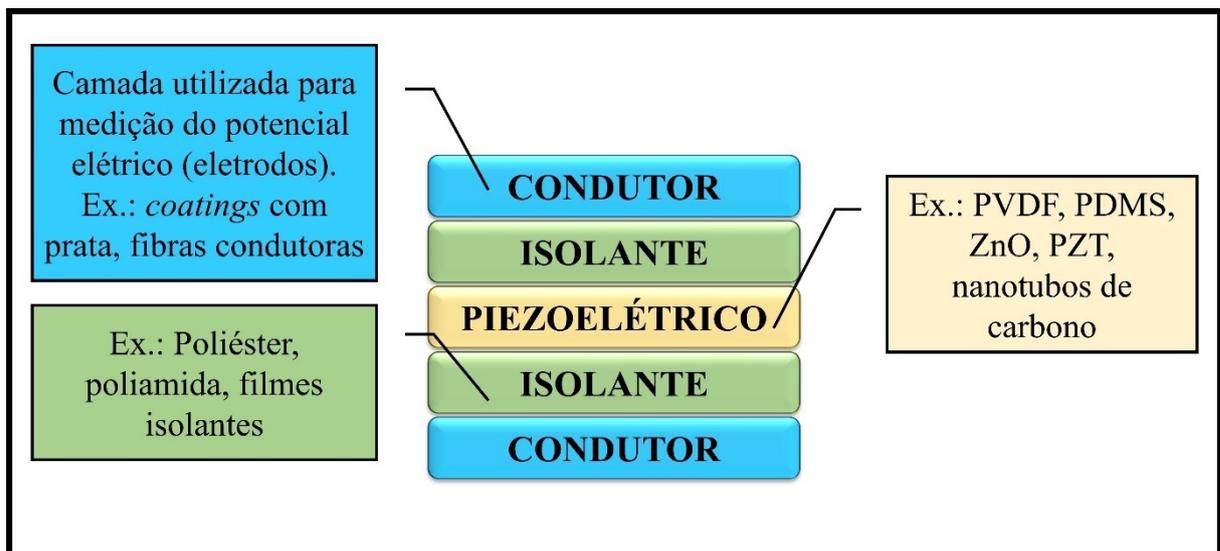
Para o desenvolvimento de têxteis com propriedade piezoelétrica, os polímeros piezoelétricos são a escolha mais adequada devido a sua reduzida massa em combinação com excelente flexibilidade e resistência à tração (LUND et al., 2018).

O desenvolvimento de têxteis com propriedades piezoelétricas é particularmente interessante para a criação de novas tecnologias no segmento de têxteis eletrônicos (*e-textiles*). Os têxteis piezoelétricos apresentam inúmeras vantagens e sua capacidade de detecção de deformação os torna propícios para aplicações em peças do vestuário para, por exemplo,

monitorar o corpo humano fornecendo informações sobre o movimento realizado e sinais vitais (como respiração, detecção de pulso carotídeo, pulso da artéria radial, ápice do coração e vibração da voz) (KRUCIŃSKA et al., 2010).

Além disso, existem os transdutores (dispositivo que transforma um tipo de energia em outro) construídos utilizando o polímero PVDF, que podem ser desenvolvidos como uma interface em vestuário inteligente, atuando como sensores de contato. Tais materiais são capazes de criar eletricidade a partir de cargas geradas por movimentos do corpo humano durante atividades diárias, que provocam a geração de potencial elétrico. Neste caso, para um melhor aproveitamento, a localização ideal do têxtil piezoelétrico se dá nas regiões de maior movimentação, como cotovelos, joelhos e ombros (KRUCIŃSKA et al., 2010). Muitas vezes, o dispositivo têxtil piezoelétrico é formado por diferentes camadas de material, conforme é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Composição esquemática de um dispositivo têxtil piezoelétrico.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Diversos materiais têxteis podem ser desenvolvidos com o efeito piezoelétrico, tais como fibras bicomponentes e malhas *spacer*, bordados com fios condutores (LUND et al., 2018); sensores tácteis para uso em vestuário na forma de *wearable* (HE et al., 2017a; LUND et al., 2018; PROTO et al., 2017; WANG et al., 2018); palmilhas inteligentes (HUANG et al., 2015; ZHANG; CHEN; GUO, 2019); estampas piezoelétricas (ALMUSALLAM et al., 2017);

luvas com sensores de movimentos (HARITO et al., 2020; JI; CHO; YUN, 2019; KHAN et al., 2018; SERRANO-GARCIA et al., 2019; ZHANG; CHEN; GUO, 2019); toldos externos para captação de energia (JALIL, 2020); incorporação de aditivos com propriedades piezoelétricas, bem como cápsulas (a partir do encapsulamento de materiais piezoelétricos) (JI; CHO; YUN, 2019; SHI; AKBARZADEH, 2019); peles artificiais humanas para captação de sinais (HE et al., 2017a; PARK et al., 2019; PONNAMMA et al., 2019); dispositivos têxteis piezoelétricos para cultivo de células artificiais, atuando como *scaffolds* (PARK et al., 2019); e não tecido piezoelétrico para geração de energia a partir de captação de ondas acústicas (HWANG; CHOI; KIM, 2019).

Lund et al. (2018) mencionam em sua pesquisa a comparação entre estruturas de malha e de tecido plano na obtenção de materiais têxteis com condutividade elétrica. Nesta comparação, pode-se mencionar que os tecidos planos não oferecem grande “ondulação” dos fios no seu processo de entrelaçamento – ou seja, a quantidade de fio inserida numa mesma área é superior nas malhas que em tecidos, o que permite elevado alongamento. Além disso, geralmente utilizam-se fibras rígidas para a formação de tecidos condutores por este método. Uma limitação deste processo utilizando as fibras rígidas é que o tecido formado não permite ser esticado, por exemplo. Todavia, para as estruturas de malha a elasticidade é uma característica inerente do processo, e neste caso uma resposta referente ao alongamento uniaxial e biaxial é possível. Esta característica permite um ajuste ao corpo no caso de aplicações no vestuário. Pela técnica de malharia é possível combinar fibras rígidas com fios têxteis mais flexíveis e obter-se então uma malha condutora e maleável (LUND et al., 2018).

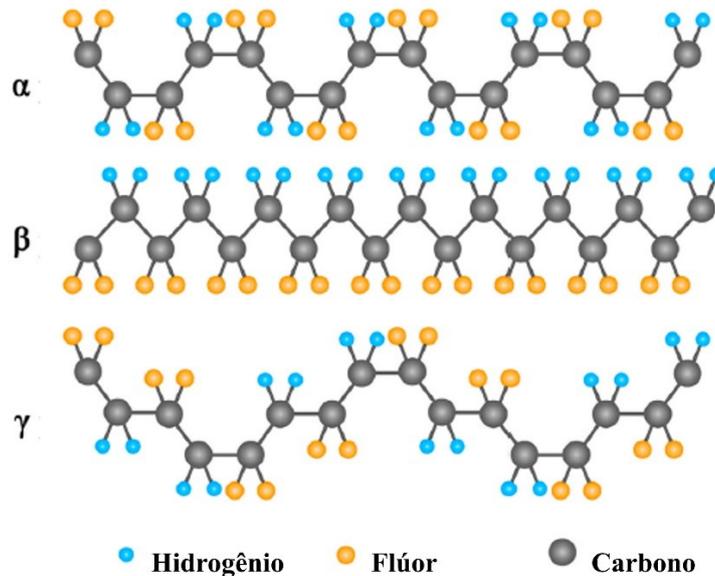
2.4 POLÍMEROS COM PROPRIEDADE PIEZOELÉTRICA

Um polímero com propriedades piezoelétricas fortemente citado na literatura, como já mencionado, é o PVDF (ROUNDY; TROLIER-MCKINSTRY, 2018), devido às suas características de baixo custo, flexibilidade, inerte, fácil processamento e boa estabilidade dimensional (SERRANO-GARCIA et al., 2019; WANG et al., 2018; YANG et al., 2017).

O PVDF é um polímero semicristalino que possui cinco fases (α , β , γ , δ , e ϵ) dependendo das suas condições de fabricação, sendo a fase β a mais interessante para o efeito piezoelétrico (BAIRAGI; ALI, 2019; GHOSH; MANDAL, 2018; GRYSHKOV et al., 2021; JEONG et al., 2018; KHALIFA; MAHENDRAN; ANANDHAN, 2019), pois apresenta o momento polar mais forte e o mais elevado momento dipolo elétrico (8×10^{-30} C.m) (WANG

et al., 2018), além de possuir conformação *all-Trans* (TTTT), em que os átomos de flúor se localizam em um mesmo lado da cadeia (MERLINI, 2014; SHETTY et al., 2019; TOHLUEBAJI; PUTSON; MUENSIT, 2019). A representação esquemática do polímero PDVF pode ser observada na Figura 6, em suas conformações α , β e γ .

Figura 6 – Conformações α , β e γ do PVDF.



Fonte: Adaptado de (LU et al., 2020a)

Além disso, características importantes para a obtenção de bons resultados do efeito piezoelétrico do PVDF são: a orientação das cadeias e o grau de cristalinidade do polímero (FERRI et al., 2019; KHALIFA; MAHENDRAN; ANANDHAN, 2019), que está fortemente relacionado ao arranjo da unidade de repetição do material. Para aprimorar ainda mais as propriedades piezoelétricas do PVDF, também pode-se controlar o seu processo de fabricação para que ocorra um aumento da sua fase β (SHEHATA et al., 2018).

Além deste, também são citados o polidimetilsiloxano (PDMS) (ALMUSALLAM et al., 2017; JI; CHO; YUN, 2019; LEE et al., 2019); polipropileno (PP), PLLA (ANDO et al., 2019; GUERIN; TOFAIL; THOMPSON, 2019), PLGA (BAIRAGI; ALI, 2019; SERRANO-GARCIA et al., 2019), PTFE, PES e blendas entre estes materiais (ALI; ASHRAF; TAYYABA, 2019; PROTO et al., 2017; ZHANG et al., 2015a; ZHANG; CHEN; GUO, 2019; ZHENG et al., 2016), PZT, BaTiO₃ (HE et al., 2019; SHI; AKBARZADEH, 2019), niobato de potássio (KNbO₃), seleneto de cádmio (CdSe), niobato de sódio (NaNbO₃) (LEE et al., 2019),

celulose (GUERIN; TOFAIL; THOMPSON, 2019; PARK et al., 2019), fibroína de seda (SENCADAS et al., 2019), telúrio (Te) (HE et al., 2017b), entre outras composições químicas, como materiais com potencial para aplicações contendo característica piezoelétrica.

2.5 POLÍMEROS INTRINSECAMENTE CONDUTORES

A condutividade elétrica de um material determina a sua capacidade de conduzir corrente elétrica, sendo diretamente proporcional a quantidade de elétrons livres que o material apresenta em sua estrutura (LIMA et al., 2018).

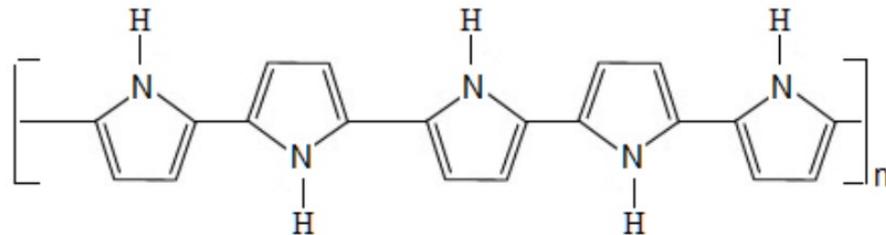
Os materiais poliméricos são conhecidos por suas propriedades como leveza e flexibilidade. A maior parte desses materiais são isolantes pois não possuem uma quantidade suficiente de elétrons livres para serem compartilhados no processo de condução, sendo assim não são eficientes para conduzir eletricidade (LIMA et al., 2018). No entanto, existe uma classe de polímeros conhecida como polímeros intrinsecamente condutores (PICs), que são polímeros sintéticos com capacidade de conduzir elétrons. Estes materiais são reconhecidos como uma classe de materiais orgânicos com propriedades elétricas únicas, que em alguns casos podem ser semelhantes às de materiais semicondutores inorgânicos e metais (NEZAKATI et al., 2018).

Os polímeros condutores têm atraído interesse significativo durante as últimas décadas por sua capacidade de fornecer condutividade elétrica, a qual pode ser ajustada durante seu processamento (RONG; LEI; LIU, 2018), e dentre suas aplicações pode-se mencionar: sensores químicos e biológicos, térmicos e eletromecânicos; blindagem eletromagnética; tintas anticorrosivas; membranas de separação de gases; dispositivos electrocrômicos; baterias recarregáveis; supercapacitores; músculos artificiais e células neuronais (MERLINI, 2014).

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 (ASYRAF et al., 2017; GRANCARIĆ et al., 2018; NEZAKATI et al., 2018; TAGHIZADEH et al., 2020).

Um dos polímeros extensivamente estudados neste campo é o PPy, devido à sua elevada condutividade elétrica, estabilidade térmica, flexibilidade e fácil síntese (MERLINI et al., 2012). A estrutura química do PPy pode ser observada na Figura 7.

Figura 7 – Estrutura química do polímero PPy.



Fonte: (POPLI; PATEL, 2015)

O método de polimerização por oxidação química é uma técnica que utiliza monômeros, oxidantes (FeCl_3 , por exemplo) e dopante. Durante o processo de polimerização, as variáveis importantes nas propriedades finais do polímero são: temperatura, tempo, concentração e natureza do agente oxidante e origem do solvente (CHOUDHARY; ANSARI; PURTY, 2020).

2.6 TECNOLOGIA DE MALHARIA

A tecnologia de malharia requer fibras relativamente finas, resistentes e com boas propriedades de elasticidade (SPENCER, 2001). Os tecidos de malha são classificados em malhas por trama e malhas por urdume, e as principais diferenças entre estas tecnologias são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Principais diferenças entre malharia por trama e por urdume.

Por trama	Por urdume
Entrelaçamento no sentido horizontal (largura)	Entrelaçamento no sentido vertical (comprimento)
1 ou mais fios podem alimentar todas as agulhas	Vários fios (cada agulha é responsável por um fio)

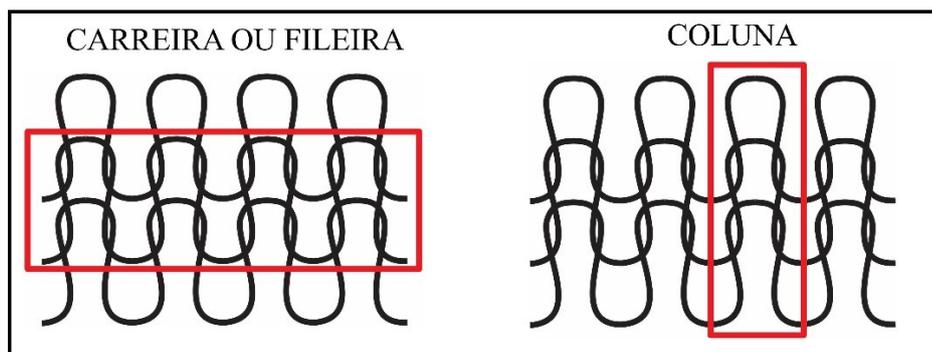
Por trama	Por urdume
Laçadas são formadas sucessivamente na direção das fileiras	Laçadas são formadas simultaneamente na direção das colunas, por diferentes fios
Teares retilíneos e circulares (monofrontura e duplafrentura)	Teares retilíneos (Ketten e Raschel)
Alimentação dos fios proveniente de cones	Alimentação dos fios proveniente de carretéis
Possibilidade de desmalhar/desconstruir	Impossibilidade de desmalhar/desconstruir

Fonte: Adaptado de (SPENCER, 2001).

2.6.1 Tecnologia de malharia por trama

Como mencionado no Quadro 3, as estruturas de malha por trama são construídas por sucessão de laçadas no sentido das fileiras/carreiras ou cursos, como ilustrado na Figura 8. A partir da combinação de diferentes tipos de laçada, ou pontos (normal, carregado e flutuante), obtêm-se diferentes estruturas de malhas, com distintas propriedades e aplicações (AU, 2011; SPENCER, 2001).

Figura 8 – Identificação de carreira e coluna em estrutura de malha.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

No geral, as laçadas de malha com maior comprimento dão origem a malhas mais leves e flexíveis, em contrapartida apresentando menor resistência a abrasão e menor fator de cobertura (SPENCER, 2001). O cálculo de fator de cobertura (FC) é apresentado na Equação 1.

$$FC = \frac{\sqrt{tex}}{l(cm)} \quad (1)$$

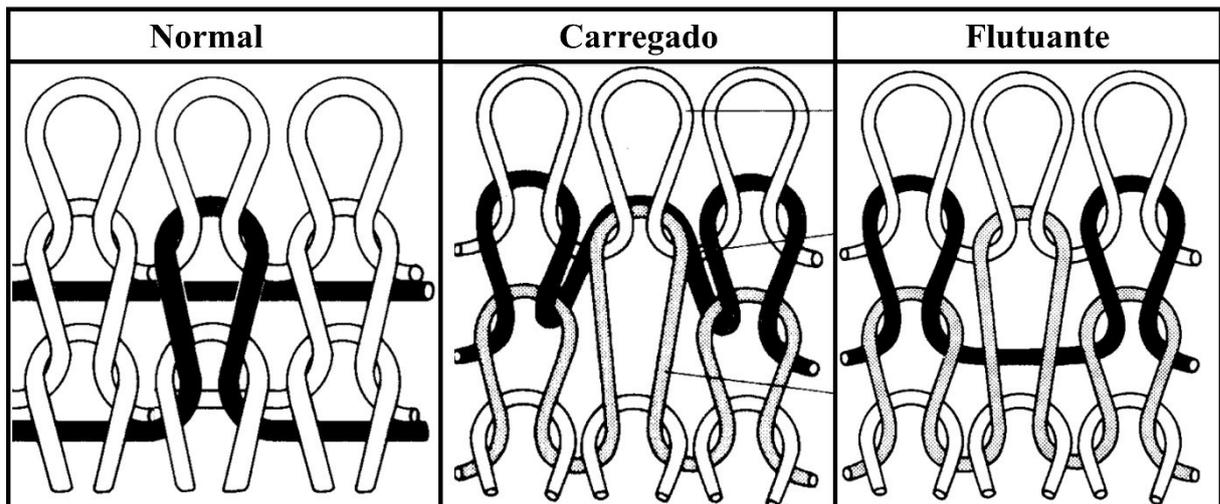
Onde FC é o fator de cobertura, tex é uma unidade de medida que representa o título direto do fio utilizado, e l se refere ao comprimento da laçada em centímetros.

A laçada do tipo normal é o ponto mais comum na malharia, sendo a base dos tecidos conhecidos como meia-malha ou jersey.

O segundo tipo de laçada mencionado é o ponto carregado, que pode ocasionar um encolhimento da malha no sentido do comprimento (colunas), devido ao tensionamento gerado no seu processo de formação. A laçada carregada promove tecidos mais largos, de maior elasticidade e elevada gramatura (RAY, 2011).

A laçada flutuante nada mais é do que um ponto que não foi tricotado, ou seja, a agulha permaneceu desativada e o fio flutuando no seu avesso técnico. Este tipo de ponto diminui a elasticidade da malha na sua largura, proporciona boa estabilidade dimensional e consequentemente maior rigidez (RAY, 2011; SPENCER, 2001). As três laçadas citadas são ilustradas na Figura 9.

Figura 9 – Tipos de pontos na malharia por trama: normal, carregado e flutuante.

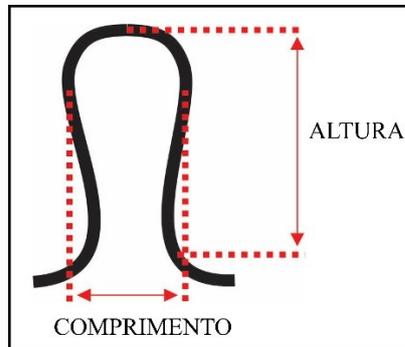


Fonte: Adaptado de (SPENCER, 2001)

Os principais parâmetros de tecidos de malha por trama são: tipo de ponto/laçada a ser utilizada, onde sua combinação dará origem ao raporte; comprimento da laçada; número de fileiras e de coluna por uma unidade de comprimento (geralmente em polegada ou centímetros),

que dará origem a densidade, gramatura e ao FC (RAY, 2011). Os parâmetros de altura e comprimento da laçada são ilustrados na Figura 10.

Figura 10 – Identificação da altura e comprimento da laçada.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A formação das estruturas de malha por trama se dá em teares retilíneos ou circulares, e os principais elementos formadores de malha por trama são: agulha (prensa, composta ou lingueta); platinas (teares monofrontura), cames, e alimentadores. Além disso, a centralização ou não das agulhas (no caso de teares circulares duplafrentura) também influencia no tipo de estrutura final da malha (AU, 2011; SPENCER, 2001).

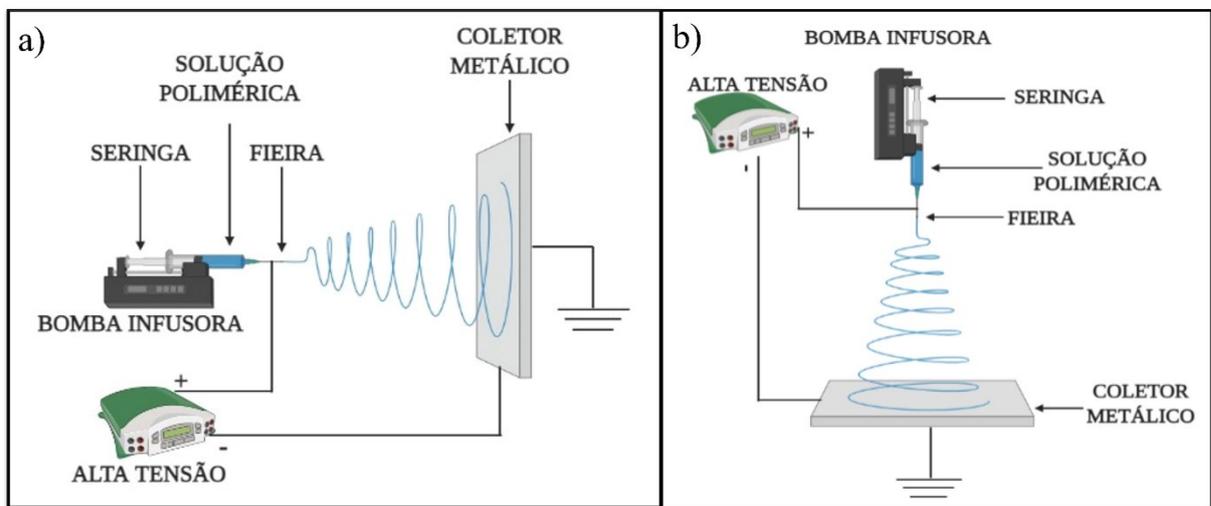
2.7 TÉCNICA DE ELETROFIAÇÃO

O processo de eletrofiação é uma técnica simples e versátil. Consiste em um processo que permite a formação de nãotecidos com fibras em escala nanométrica. As fibras formadas por esta técnica variam na faixa de 10 nanômetros (nm) até 10 micrometros (μm), contando com comprimentos que podem ser quilométricos (MERLINI, 2014).

Neste método, uma solução polimérica previamente solubilizada é inserida em uma seringa. Esta seringa contendo a solução polimérica é posicionada em uma bomba de infusão (ou alimentação), e a ponta da seringa é carregada eletricamente, conectada à uma fonte de alta tensão que varia entre 1 e 30 kV. A bomba de infusão está localizada à frente da placa coletora metálica aterrada, e a partir do momento em que a fonte de alta tensão é ligada, as nanofibras vão se formando na placa coletora metálica. O que ocorre, é que conforme a solução polimérica vai saindo da seringa, é atraída rapidamente pelo campo elétrico formado, promovendo um estiramento desta solução, que dá origem às nanofibras e conseqüentemente ao nãotecido

(SURESH; BECKER; GLASMACHER, 2020; TIWARI et al., 2019). Ou seja, durante o processo, um campo elétrico é gerado, pois a gota que se encontra na extremidade da agulha é carregada eletricamente, e as cargas elétricas ficam distribuídas de forma homogênea na superfície do fluido. As forças aplicadas à esta gota serão responsáveis pelo estiramento da mesma, que seguirá em direção à placa coletora metálica (MERLINI, 2014). Um esquema ilustrativo do processo de eletrofiação é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama esquemático do processo de eletrofiação a) na horizontal; b) na vertical.



Fonte: Elaborado pela autora com auxílio do *software* Biorender® (2021)

Nesta técnica, os principais parâmetros são: viscosidade da solução polimérica, tensão aplicada, distância entre a seringa e a placa coletora, vazão da solução polimérica, temperatura ambiente, umidade e massa molar (SINGH; LYE; MIAO, 2021; SURESH; BECKER; GLASMACHER, 2020; YADAV et al., 2021).

Os nãotecidos formados pelo método de eletrofiação apresentam elevada área de superfície, flexibilidade, porosidade, baixo custo e boas propriedades mecânicas (GEE; JOHNSON; SMITH, 2018; YADAV et al., 2021). O processo de eletrofiação permite, ainda, a inserção de várias seringas e/ou seringas coaxiais, com diferentes polímeros, possibilitando a formação de compósitos e nãotecidos com propriedades específicas, dependendo da aplicação desejada (LU et al., 2020b; SURESH; BECKER; GLASMACHER, 2020; WANG et al., 2021).

As principais aplicações de nãotecidos eletrofiados estão concentrados na área médica e da saúde, bem como curativos e agentes atuando na liberação controlada de medicamentos.

Pode-se citar também seu uso em produtos relacionados a proteção, filtração, sensores, entre outros (YADAV et al., 2021).

3 METODOLOGIA

A parte experimental do presente trabalho foi dividida em quatro etapas: produção das malhas por trama, incorporação de PPy às malhas, produção do não tecido de PVDF eletrofiado, e desenvolvimento do dispositivo têxtil piezoelétrico.

3.1 MATERIAIS

Os fios utilizados na construção das amostras de malha possuem composição 100% PES texturizado, 96 filamentos, de título 600 denier.

Por sua elevada condutividade elétrica, a utilização do PPy consiste em uma camada condutora externa ao dispositivo têxtil, necessária para medir a diferença de potencial gerada por meio de pressão mecânica. 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.

O polímero utilizado neste estudo foi o PVDF Solef[®], da marca Sigma, massa molar $534.000 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Os solventes utilizados para dissolver o PVDF foram a dimetilformamida (DMF) e a acetona, ambos da marca Neon.

3.2 MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido no Laboratório de Tecidos e Malhas (LABTEC), Laboratório de Transformações e Materiais Avançados (LTMA), Laboratório de Polímeros e Compósitos (POLICOM), e no Laboratório de Desenvolvimento de Produtos Têxteis (LDPT), todos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

3.2.1 Desenvolvimento de malhas de PES por trama

A produção das malhas de PES por trama foi realizada a partir da utilização de um tear retilíneo da marca Mitsubishi[®], modelo Color 7, conforme Figura 12.

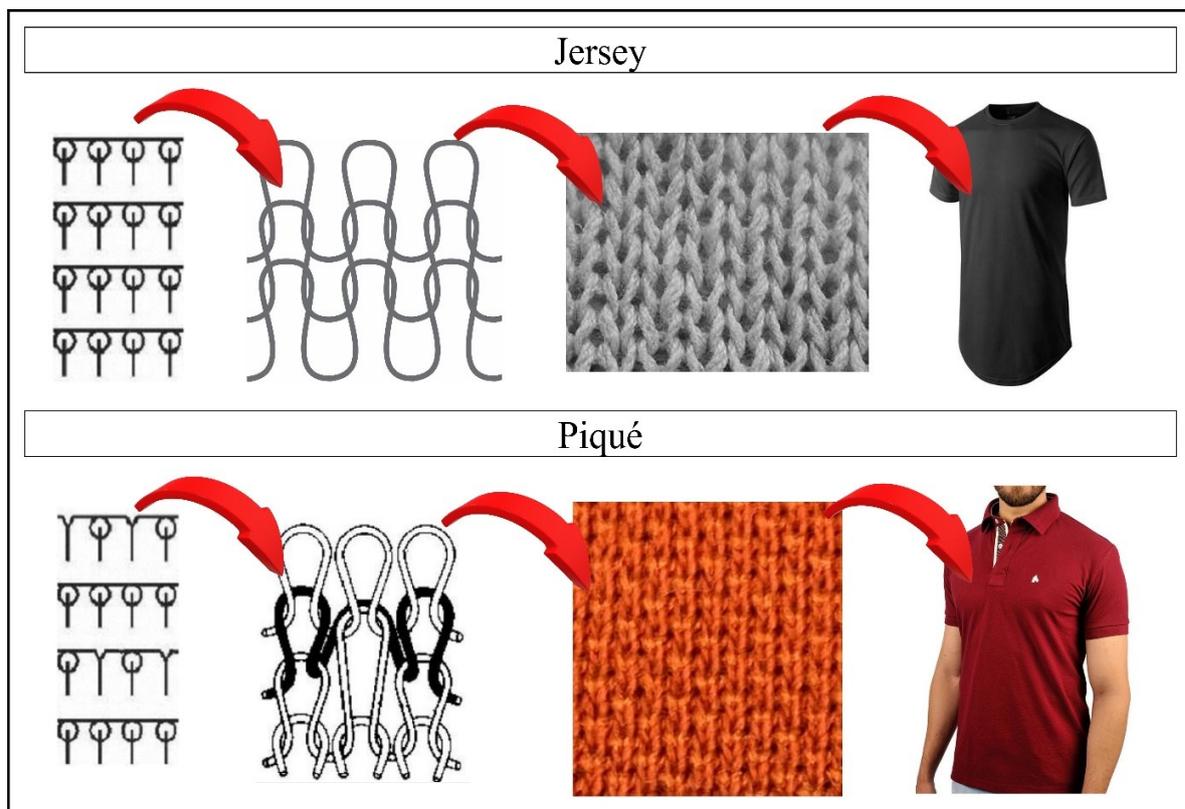
Figura 12 – Tear retilíneo de malha por trama.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Foram desenvolvidas duas estruturas de malha, nomeadamente jersey e piqué, desenvolvidas a partir do mesmo método de construção, identificadas como Jersey A, Jersey B, Jersey C, Jersey D, Jersey E, e Piqué A, Piqué B, Piqué C, Piqué D e Piqué E. Ou seja, foram elaboradas cinco amostras iguais de malha para cada tipo da estrutura supracitada. A Figura 13 ilustra o raporte das malhas jersey e piqué, respectivamente. No raporte, é possível observar a presença de laçadas carregadas, na primeira e terceira fileira, respectivamente primeira e segunda colunas, da estrutura piqué, o que confere a malha propriedades distintas.

Figura 13 – Raportes jersey e piqué.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

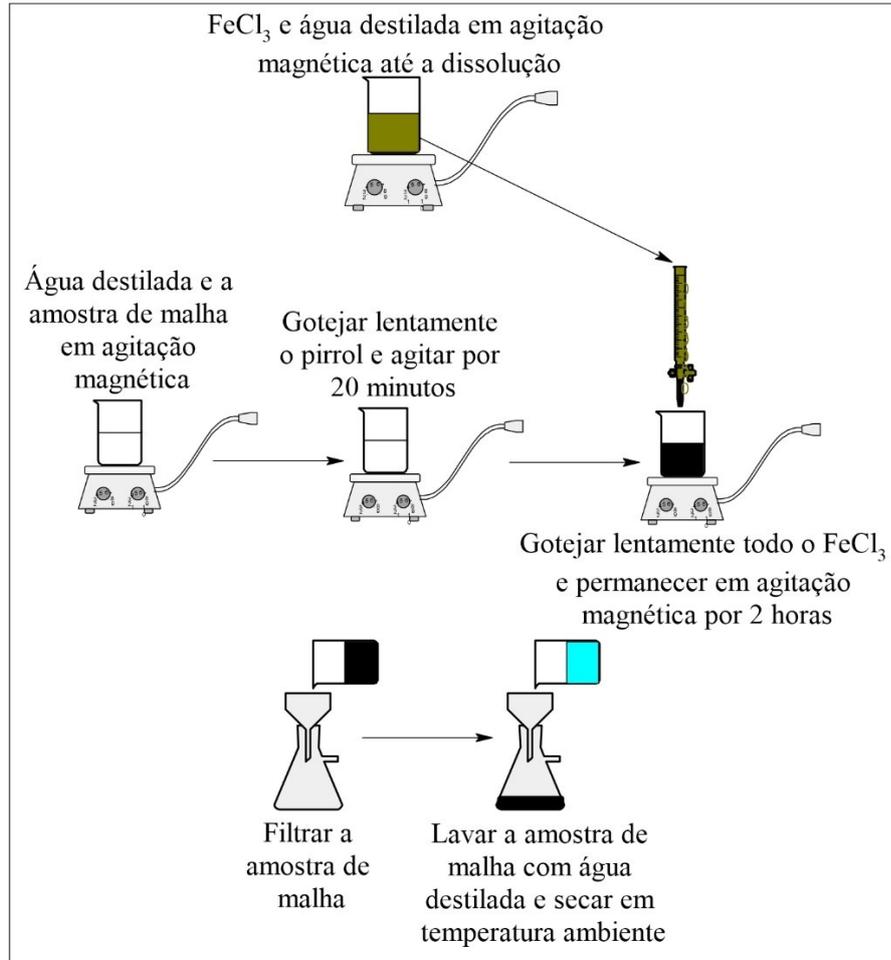
3.2.2 Polimerização *in situ* do pirrol nas amostras de malha

Durante o processo de polimerização do pirrol, as malhas por trama produzidas foram submersas em banho aquoso submetidas à polimerização *in situ* do pirrol, de acordo com a metodologia reportada por Merlini (2014) (MERLINI, 2014). As quantidades foram calculadas para uma solução com concentração de monômero de 0,1 mol/L. Esta solução foi realizada para amostras de malha de massa 5g.

Em um béquer, foi adicionado 33,6g de $\text{FeCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ em 200 mL de água destilada em agitação magnética constante, em temperatura ambiente (21,8 °C) até a completa dissolução do $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, por aproximadamente 15 minutos. Em um outro béquer, adicionou-se 360 mL de água destilada e a amostra de malha de 5g. Nesta solução, foi gotejado 4,2 mL do monômero pirrol líquido, permanecendo a solução em agitação magnética constante por 20 minutos, em temperatura ambiente (21,8 °C). Para dar início à polimerização, a solução contendo $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (oxidante) foi lentamente gotejada na solução aquosa contendo a malha com o

pirrol, permanecendo em agitação magnética durante 6 horas. Por fim, as amostras de malha foram filtradas em papel filtro e secas em temperatura ambiente. Um esquema ilustrativo do processo mencionado é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Esquema ilustrativo do processo de polimerização oxidativa *in situ* do pirrol nas amostras de malha.



Fonte: Adaptado de (MERLINI et al., 2012)

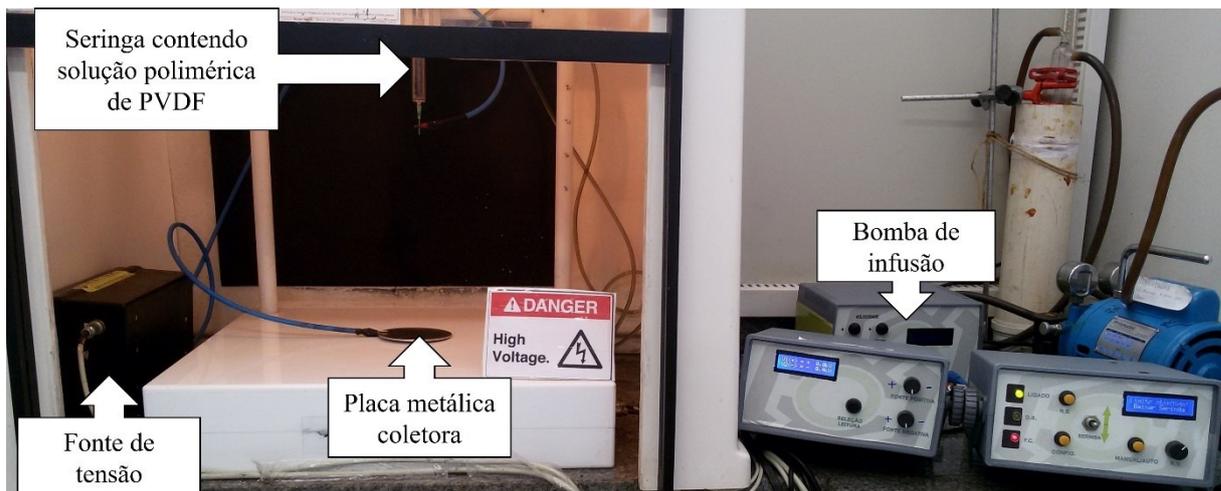
3.2.3 Desenvolvimento de nãotecidos de PVDF por eletrofiação

Os nãotecidos de PVDF foram desenvolvidos pelo método de eletrofiação, de acordo com a metodologia reportada por Merlini (2014) (MERLINI, 2014). Para isso, uma solução polimérica de PVDF foi preparada com concentração total de 20% (m/m). O polímero PVDF foi dissolvido em DMF, em agitação magnética constante à 70 °C por 2 horas até a completa solubilização do polímero. Depois, a solução foi resfriada para 25 °C em banho-maria por 10

minutos e em seguida, a acetona foi adicionada, mantendo-se a solução em constante agitação magnética por mais 5 minutos em temperatura ambiente.

Para a realização do processo de eletrofição, a solução polimérica foi inserida em seringa de vidro de 5 mL com agulha de 0,7mm de diâmetro, posicionada em bomba de infusão à uma vazão de 2,0 mL/h (Harvard Apparatus 11 Plus). A tensão aplicada ao processo foi de 12,6 kV na agulha e de -1,0 kV no coletor metálico aterrado, com auxílio de fonte de alimentação com corrente contínua (Spellman SL30) para a geração do campo elétrico. A distância entre a agulha e o coletor foi de 15 cm. A placa coletora metálica possui diâmetro de 8cm. O aparato de eletrofição utilizado para a construção dos nãotecidos eletrofiados de PVDF é posicionado verticalmente, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Aparato de eletrofição.



Fonte: (MERLINI, 2014)

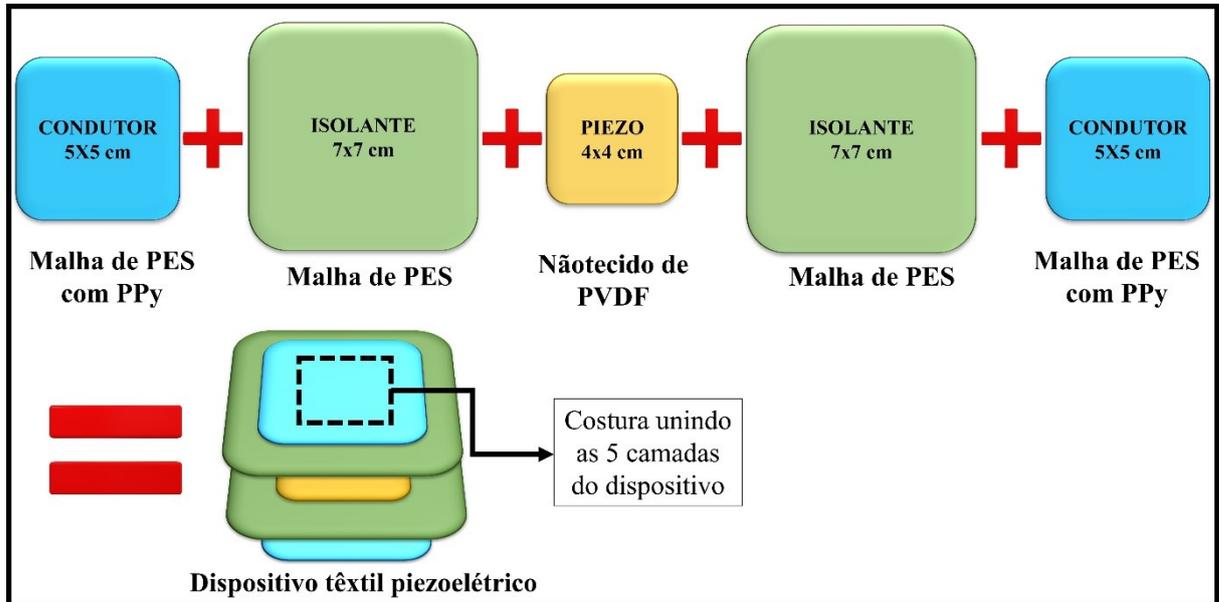
O processo foi realizado em condições normais de temperatura e pressão, e o tempo total da eletrofição foi de 1h para cada amostra.

3.2.4 Construção do dispositivo têxtil piezoelétrico

Após a obtenção das camadas individualmente (isolante (malha de PES); condutora (malha de PES com PPy); e piezoelétrica (nãotecido de PVDF)), foi desenvolvido o dispositivo, o qual foi constituído de uma camada do material condutor ao centro, seguido de duas camadas de material isolante (uma em cada lado da camada piezoelétrica), e por fim, duas camadas do

material condutor, posicionadas em cada extremidade. Para a construção do dispositivo têxtil piezoelétrico, a partir da união das camadas têxteis, utilizou-se máquina de costura reta eletrônica, da marca Westman. O processo é ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Esquema ilustrativo do processo de construção do dispositivo têxtil piezoelétrico.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A camada piezoelétrica do material, de tamanho 4x4 cm, é a camada determinante para caracterizar a área útil do dispositivo piezoelétrico, ou seja, apenas na área que contempla camada de PVDF é que o material apresenta potencial efeito piezoelétrico. No entanto, as camadas isolantes, constituídas de malhas por trama de PES, necessitam ser de um tamanho superior para evitar o contato entre as duas camadas externas do dispositivo (camadas condutoras formadas pelas malhas contendo o PPy). Além disso, o tamanho da amostra de malhas de PES (7x7cm) é ainda justificado devido ao fato de que as malhas do tipo jersey e piqué apresentam encharutamento (enrolamento) nas suas laterais, que são características de malhas monofrontura.

3.3 CARACTERIZAÇÕES

As caracterizações realizadas nas amostras do presente trabalho possuem foco em caracterização têxtil e análise do efeito piezoelétrico.

3.3.1 Comprimento de laçada das malhas

O comprimento de laçada das malhas foi analisado seguindo procedimento padrão, contando 50 colunas para identificação do comprimento na unidade de medida centímetros, utilizando equipamento *Maillimeter* (Figura 17), do LABTEC-UFSC, *campus* Blumenau para as medições. A verificação do comprimento médio ocorreu para as 5 amostras produzidas para cada grupo de malhas.

Figura 17 – Equipamento *Maillimeter*.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

3.3.2 Espessura das malhas

A espessura das malhas, em milímetros, foi analisada com auxílio de paquímetro manual da marca Insize, modelo Vernier Caliper, do LABTEC, da UFSC, *campus* Blumenau. A verificação da espessura média ocorreu para as cinco amostras produzidas para cada grupo de malhas, ou seja, cinco amostras iguais da malha jersey de PES, sem e com PPy; e cinco amostras iguais da malha piqué de PES, sem e com PPy, com o objetivo de comparar a influência do tratamento. Ainda, foram analisadas as espessuras dos dispositivos têxteis produzidos, também comparando os dispositivos construídos com a estrutura jersey e piqué.

3.3.3 Fator de cobertura

O fator de cobertura das malhas foi analisado de acordo com a equação 1, do item 2.6.1 deste documento.

3.3.4 Gramatura

As amostras de malha 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 equação 2). A verificação da gramatura média ocorreu para as cinco amostras produzidas para cada grupo de malhas, comparando os resultados das malhas com e sem o revestimento com polipirrol. O dispositivo têxtil piezoelétrico também foi analisado quanto à sua gramatura. Esta análise foi realizada com auxílio de balança digital da marca KN Waagen, modelo KN3200/2, no LABTEC, da UFSC, *campus* Blumenau.

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

3.3.5 Densidade

A densidade das malhas foi analisada 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 (cálculo conforme equação 3). A verificação da densidade média ocorreu para as cinco amostras produzidas para cada grupo de malhas. A contagem das colunas e carreiras foi realizada com auxílio de conta-fios da marca Waltex, com lupa de ampliação de 8x, e área de 1 pol². Esta análise foi realizada no LABTEC, da UFSC, *campus* Blumenau.

$$\text{Densidade} \left(\frac{\text{pontos}}{\text{cm}^2} \right) = \frac{\text{n}^\circ \text{ de colunas}}{\text{cm}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ de carreiras}}{\text{cm}} \quad (3)$$

3.3.6 Espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os filamentos de PES utilizados na construção das malhas por trama também foram analisados pela técnica FTIR, para confirmação da matéria-prima mencionada. O não-tecido eletrofiado de PVDF também foi submetido à ensaio de FTIR em reflectância total atenuada (ATR), para identificação da fase β do polímero. Ambos os testes foram realizados em equipamento Espectrofotômetro Frontier FTIR, da marca Perkin Elmer, do Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE), da UFSC, *campus* Blumenau. Os espectros foram

obtidos na faixa de comprimento de onda de 4000 a 450 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 16 varreduras.

3.3.7 Resistividade elétrica pelo método 4 pontas

As amostras de malha de jersey e piqué contendo polipirrol foram submetidas à ensaios de determinação da resistividade elétrica pelo método 4 pontas. As malhas foram cortadas para obter-se um corpo de prova de 2,5 cm de diâmetro. A condutividade elétrica (σ) ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) foi calculada de acordo com a Equação 4 (MERLINI, 2014).

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

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

O resultado da resistividade elétrica (ρ) ($\Omega\cdot\text{cm}$) é definida como sendo o inverso da condutividade elétrica (σ), conforme apresentado na Equação 5.

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

Esta análise foi realizada no POLICOM, da UFSC. Neste método é aplicado uma corrente elétrica entre os terminais externos da amostra, sendo utilizada uma fonte de alta tensão da marca Keithley, modelo 6220. A diferença de potencial foi medida entre os terminais internos, com auxílio de um eletrômetro da marca Keithley, modelo 6517A.

3.3.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As amostras de malha por trama jersey e piqué foram analisadas quanto à sua morfologia, com e sem o polipirrol. Os nãotecidos de PVDF também foram analisados por MEV, para identificação do diâmetro médio das fibras (utilizando o *software* ImageJ) e demais parâmetros morfológicos. A análise foi realizada em microscópio eletrônico da marca Jeol, modelo JSM-6390LV, do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), da UFSC,

com magnitudes de ampliação de 23x, 200x, 500x, 1000x e 2000x, utilizando revestimento de ouro nas amostras.

3.3.9 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

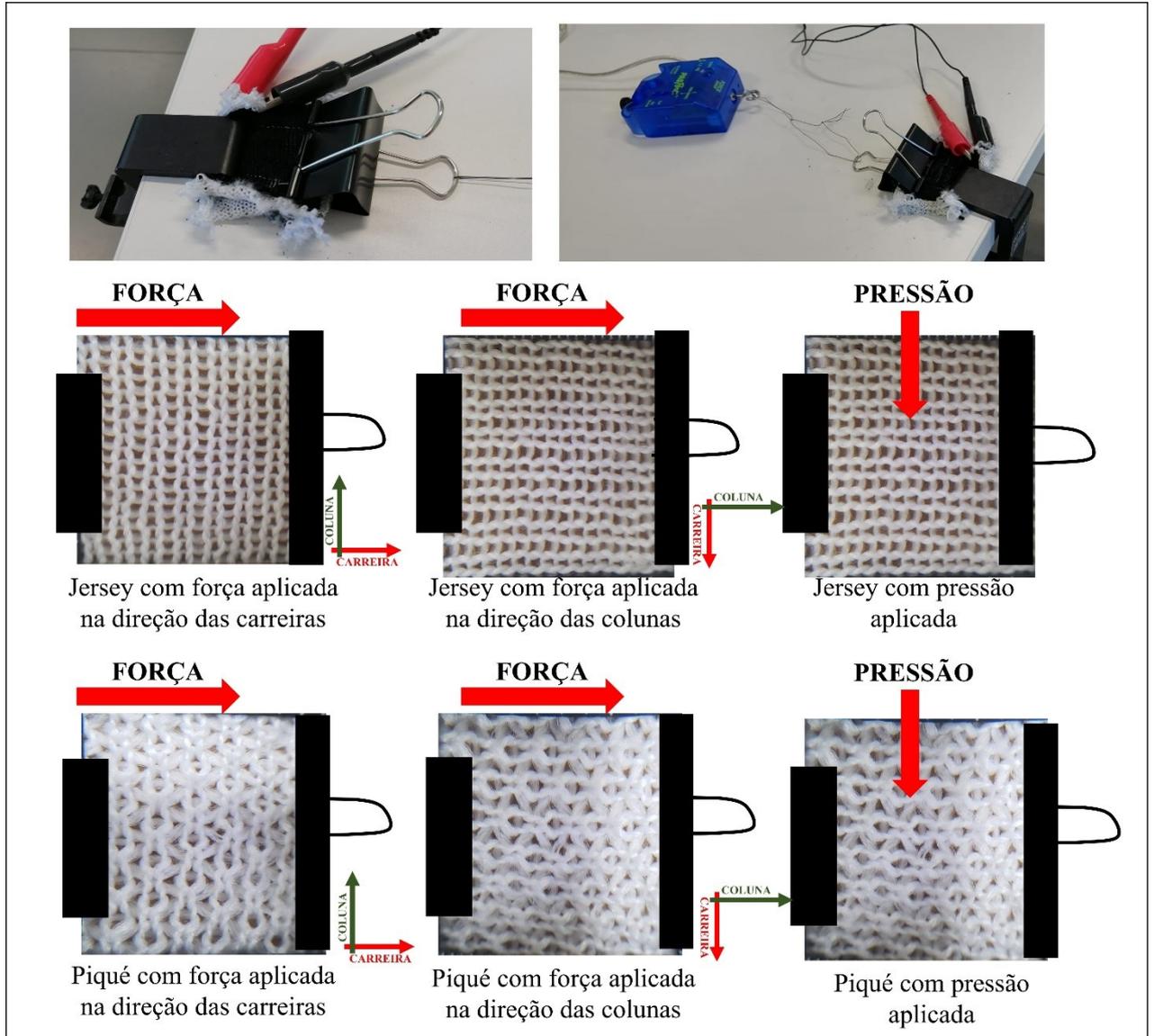
A análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) foi realizada nas amostras de nãotecido de PVDF. Para tal, foi utilizado equipamento modelo STA 449 F1 Jupiter[®], da marca Netzsch, do Laboratório de Materiais (LABMAT), da UFSC. As análises foram realizadas a uma taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹, em uma faixa de temperatura de 30 a 220 °C ou de -75 a 220 °C, em atmosfera de nitrogênio, com fluxo de 100 ml.min⁻¹.

3.3.10 Ensaio de piezoelectricidade utilizando galvanômetro e sensor de força

Os ensaios para a avaliação do efeito piezoelétrico no dispositivo foram realizados com auxílio de galvanômetro e sensor de força (N), no Laboratório de Física I, da UFSC, *campus* Blumenau. O galvanômetro usado é da marca Pasco, e o sensor de força utilizado é da marca Pasco, modelo PS-2104, ambos os equipamentos foram calibrados previamente.

Os ensaios foram realizados submetendo as amostras à ensaios de compressão, realizados manualmente, com auxílio da medição da força (em Newtons) pelo sensor de força do equipamento utilizado. Durante o ensaio o sensor de força é pressionado manualmente sob os dispositivos têxteis desenvolvidos, aplicando-se pressão ao centro das amostras, repetidas vezes. Ainda, foram realizados ensaios de forças aplicadas ao dispositivo tanto na direção das colunas quanto na direção das carreiras das malhas. Nestes ensaios, cada amostra do dispositivo têxtil é fixada em uma das suas extremidades, e à outra extremidade da amostra é colocada uma pinça adaptada para este teste, a qual está conectada ao galvanômetro e ao sensor de força. Esta pinça é então tracionada manualmente, repetidas vezes. O equipamento realiza as medições de força e tensão obtida em relação ao tempo, em segundos. A Figura 18 ilustra este processo.

Figura 18 – Método de ensaio de força *versus* diferença de potencial.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

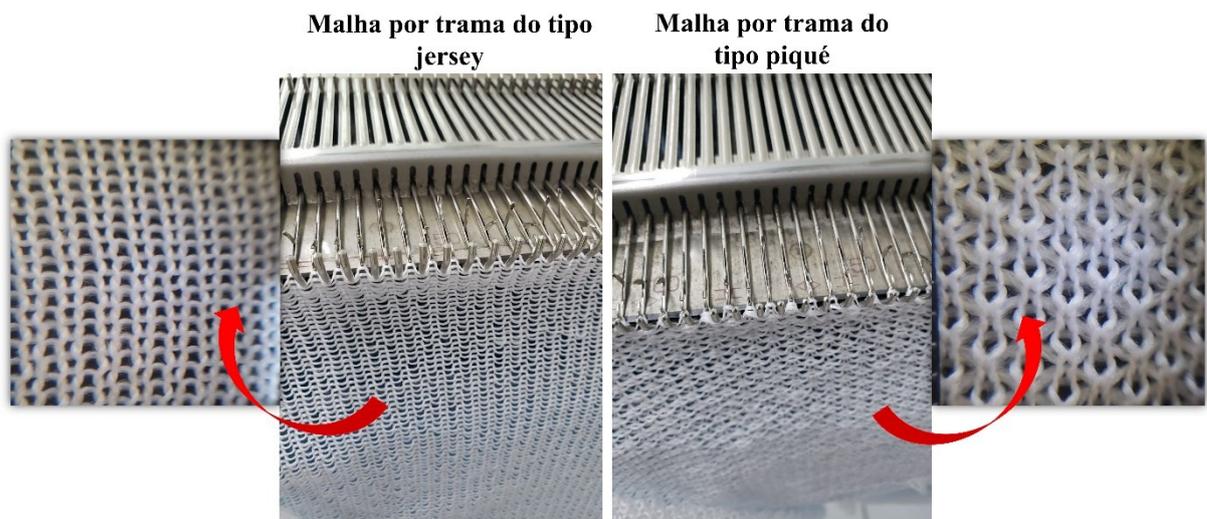
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados do presente estudo, seguida de análise e discussão após a realização dos testes.

4.1 DESENVOLVIMENTO DE MALHAS DE PES POR TRAMA

O desenvolvimento das amostras de malha de PES por trama foi efetivamente confirmado, em ambos raportes previamente mencionados (jersey e piqué), e pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Construção das malhas de PES por trama em tear retilíneo.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

As malhas de PES foram caracterizadas quanto ao comprimento da laçada, obtendo-se o comprimento de laçada médio (em centímetros) para as amostras de jersey ($0,9 \pm 0,1$ cm) e piqué ($0,9 \pm 0,1$ cm). Os resultados podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Comprimento de laçada das amostras de malha de PES

Amostras	*Comprimento total (cm)	Comprimento da laçada (cm)	Comprimento médio da laçada (cm)	Desvio padrão da laçada
Jersey A	46,0	0,9	$0,9 \pm 0,1$	0,01
Jersey B	45,5	0,9		

Amostras	*Comprimento total (cm)	Comprimento da laçada (cm)	Comprimento médio da laçada (cm)	Desvio padrão da laçada
Jersey C	45,4	0,9		
Jersey D	45,4	0,9		
Jersey E	44,5	0,9		
Piqué A	44,2	0,9		
Piqué B	43,7	0,9		
Piqué C	41,9	0,8	0,9 ± 0,1	0,03
Piqué D	45,0	0,9		
Piqué E	45,2	0,9		

*Comprimento total correspondente à 50 colunas.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observa-se que o comprimento de laçada da estrutura de malha do tipo jersey e piqué são iguais.

A espessura das malhas foi verificada e comparada, obtendo-se espessura média de 1,7 ± 0,02 mm para jersey e 2,8 ± 0,02 mm para o piqué. Os dados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Espessura das amostras de malha de PES

Amostras	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Desvio padrão
Jersey A	1,7		
Jersey B	1,7		
Jersey C	1,9	1,7 ± 0,02	0,1
Jersey D	1,7		
Jersey E	1,8		
Piqué A	2,8		
Piqué B	2,7		
Piqué C	2,8	2,8 ± 0,02	0,1
Piqué D	3,0		
Piqué E	2,9		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As malhas do tipo piqué ficaram 63,2% mais espessas do que as malhas do tipo jersey. Este resultado era o esperado, pois devido ao seu raporte, há a concentração de duas laçadas na mesma agulha, decorrente da laçada carregada, resultando em uma malha de maior espessura.

O fator de cobertura foi avaliado, e observou-se que as malhas do tipo piqué possuem maior FC (9,3) do que as malhas jersey (9,0), sendo os resultados muito similares. Ressalta-se

que, quanto maior for o fator de cobertura de uma malha, mais fechada é a mesma, ou seja, possui mais fios em sua superfície, situação esta que ocorre em malhas do tipo piqué, por apresentarem laçadas carregadas no seu raporte, elevando levemente seu fator de cobertura quando comparado à malha jersey. O fator de cobertura influencia, por exemplo, na permeabilidade ao ar, no toque e na resistência a abrasão dos substratos.

As amostras de malha de estrutura jersey e piqué foram analisadas quanto à sua gramatura média, obtendo-se resultados de $125,6 \pm 0,01 \text{ g/m}^2$ e $159,2 \pm 0,01 \text{ g/m}^2$, respectivamente. Os valores podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 – Gramatura das amostras de malha de PES

Amostras	Massa (g)	Gramatura (g/m^2)	Gramatura média (g/m^2)	Desvio Padrão
Jersey A	0,3	124		
Jersey B	0,3	124		
Jersey C	0,3	124	$125,6 \pm 0,01$	3,6
Jersey D	0,3	132		
Jersey E	0,3	124		
Piqué A	0,4	164		
Piqué B	0,4	152		
Piqué C	0,4	156	$159,2 \pm 0,01$	6,6
Piqué D	0,4	168		
Piqué E	0,4	156		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As malhas de estrutura piqué obtiveram gramatura 26,8% superior as amostras de estrutura jersey, e são em torno de 26,9% mais densas (conforme Tabela 4). Este fato é decorrente também do seu raporte, que conta com laçadas carregadas, onde há a concentração de duas laçadas na mesma agulha.

Tabela 4 – Densidade das malhas jersey e piqué

Amostras	Nº de colunas/cm	Nº de carreiras/cm	Densidade	Densidade média	Desvio padrão
Jersey A	3,2	6,8	21,8		
Jersey B	3,2	6,4	20,5		
Jersey C	3,2	6,4	20,5	$20,8 \pm 1$	0,7
Jersey D	3,2	6,4	20,5		
Jersey E	3,2	6,8	21,8		
Piqué A	3,2	8,4	26,9	$26,4 \pm 1$	0,7

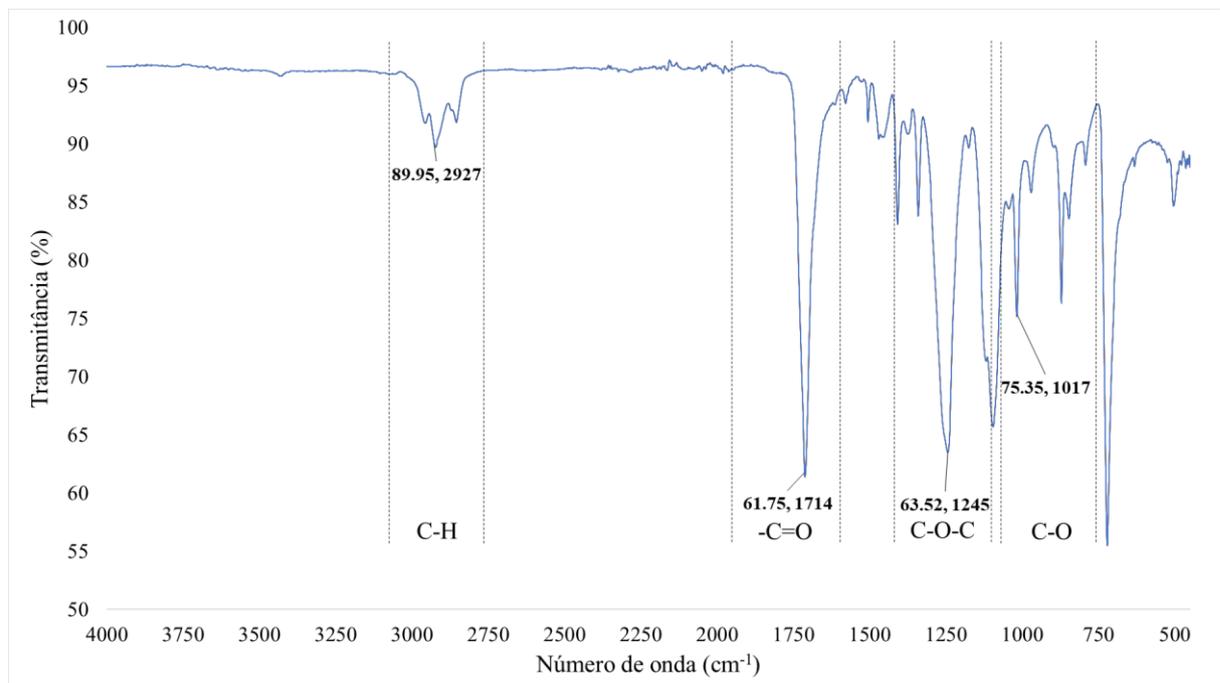
Amostras	Nº de colunas/cm	Nº de carreiras/cm	Densidade	Densidade média	Desvio padrão
Piqué B	3,2	8,4	26,9		
Piqué C	3,2	8,0	25,6		
Piqué D	3,2	8,4	26,9		
Piqué E	3,2	8,0	25,6		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A densidade das malhas está relacionada ao seu raporte. A maior densidade das malhas piqué, uma vez que possuem laçadas carregadas em sua estrutura de formação, as quais possuem dois fios em uma mesma laçada de malha, influencia sua densidade, que também está relacionada à sua espessura, conforme verificado na Tabela 2.

As amostras de malhas foram analisadas pela técnica de FTIR, para confirmação da sua matéria-prima, oriunda do polímero poliéster. A Figura 20 mostra os picos em seus respectivos comprimentos de onda, apresentando a ligação química C-H em 2927 cm^{-1} , a ligação -C=O em 1714 cm^{-1} , a ligação C-O-C em 1245 cm^{-1} , e a ligação química C-O no em 1017 cm^{-1} , faixas de número de onda que confirmam a estrutura química do polímero poliéster, conforme descrito em literaturas prévias (GARCIA et al., 2014; WU et al., 2021).

Figura 20 – FTIR das malhas de poliéster.

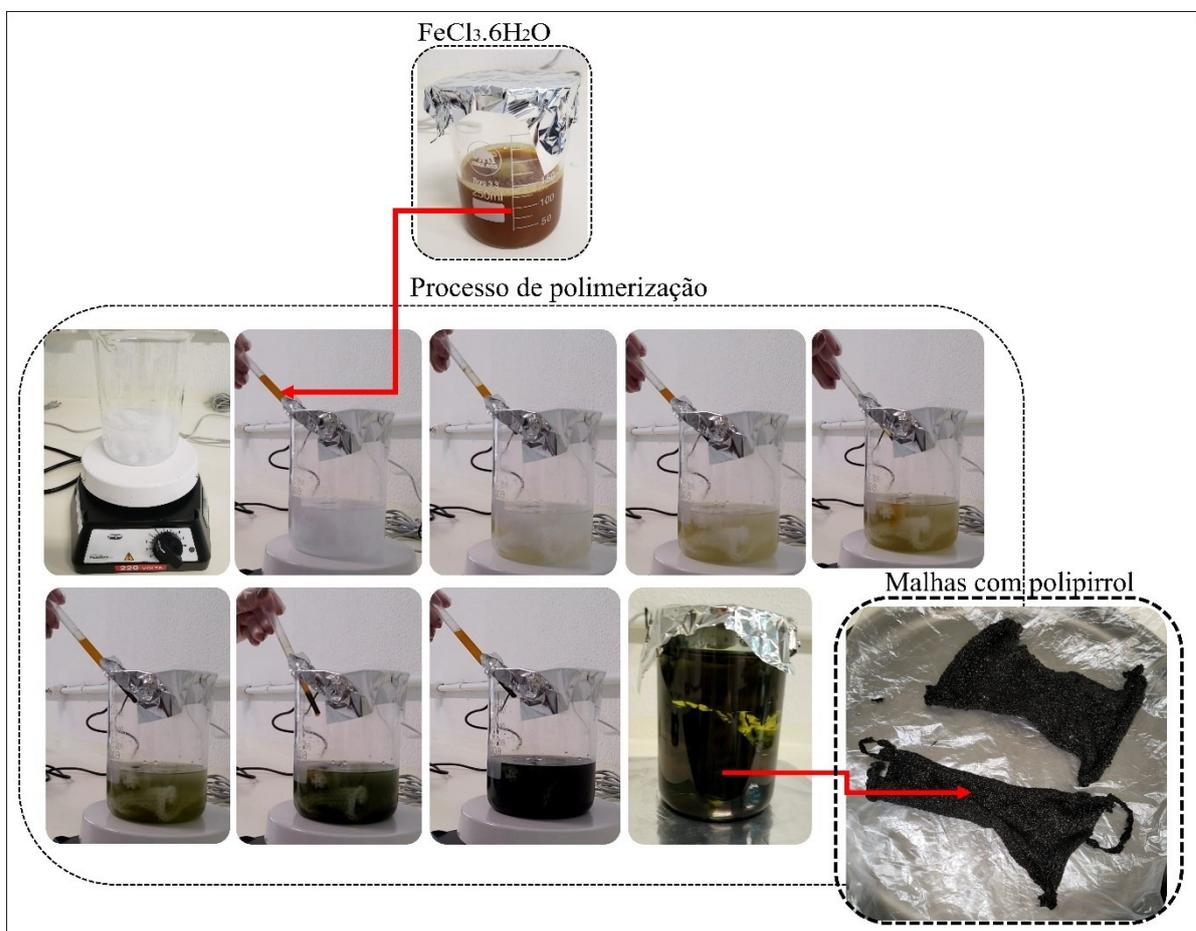


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

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. Foi observado que as malhas apresentaram o PPy depositado na superfície, ou seja, a característica de cor escura (oriunda do PPy), é transferida da solução para a amostra de malha. O processo é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Processo de polimerização *in situ* do pirrol nas amostras de malha.



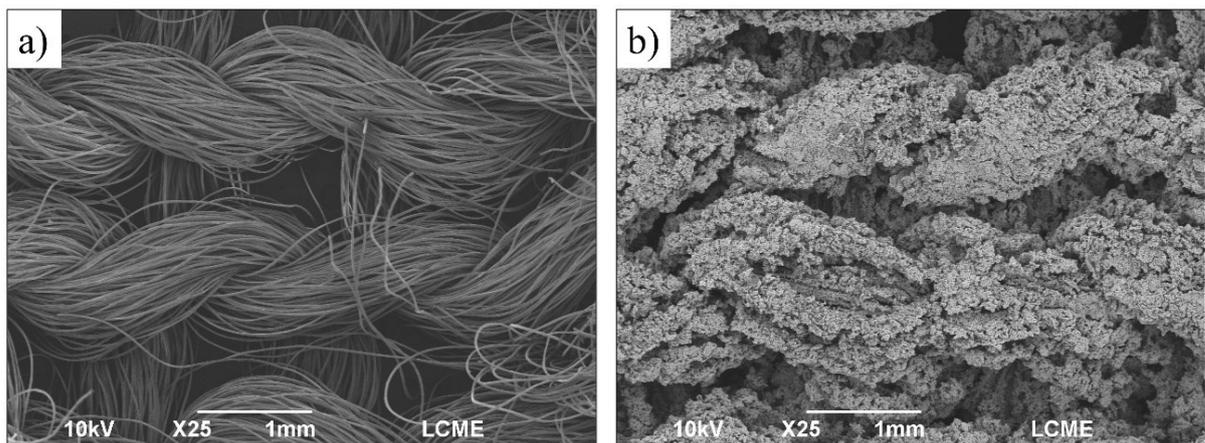
Fonte: Elaborado pela autora (2021)

As amostras de malha contendo PPy foram analisadas quanto à sua condutividade elétrica. A malha do tipo jersey apresentou condutividade elétrica de $0,32 \pm 0,001 \text{ S.cm}^{-1}$, enquanto a malha do tipo piqué apresentou condutividade elétrica de $0,52 \pm 0,024 \text{ S.cm}^{-1}$. Os valores obtidos são considerados bons, quando comparados com valores referenciais de condutividade elétrica de polímeros como o poliacetileno (de 10^{-6} a 10^4 S.cm^{-1}) e o PPy (de 10^{-

⁸ a 10^2 S.cm^{-1}) (MERLINI, 2014). No entanto, estudos preliminares já confirmaram o desenvolvimento de malhas de algodão revestidos com PPy, obtendo-se condutividade elétrica de $303 \text{ } \Omega/\text{cm}^{-2}$. Ressalta-se que a matéria-prima utilizada possui influência na adesão das fibras com o polipirrol e pode apresentar características distintas durante o seu processo de polimerização (HAO; XU; CAI, 2018). Neste trabalho de mestrado, a resistividade elétrica das malhas jersey e piqué foi de $3,13 \pm 0,001 \text{ } \Omega.\text{cm}$ e $1,92 \pm 0,024 \text{ } \Omega.\text{cm}$, respectivamente, e isto demonstra resistividade elétrica das malhas condutoras desenvolvidas, uma vez que dados da literatura apresentam bons valores de resistividade em torno de $10^{-5} \text{ } \Omega.\text{cm}$, no caso do polímero poliacetileno, por exemplo. A resistividade elétrica do PPy pode chegar até $10^{-2} \text{ } \Omega.\text{cm}$, dependendo das condições de polimerização (MERLINI, 2014). Ou seja, a fim de melhorar os valores de resistividade elétrica das malhas de PPy, diferentes concentrações de pirrol durante o processo de polimerização podem ser consideradas em trabalhos futuros, além da análise em diferente técnica de polimerização e posterior aplicação do PPy via técnica de *coating* nas malhas, pode ser estudado.

As malhas foram avaliadas quanto à sua morfologia (Figura 22), e pode-se observar a presença do polipirrol nas malhas. Como foi utilizado um multifilamento de PES, percebe-se também que o polipirrol está presente por entre os filamentos que compõem o fio de PES.

Figura 22 – MEV das malhas. a) sem polipirrol; b) com polipirrol.



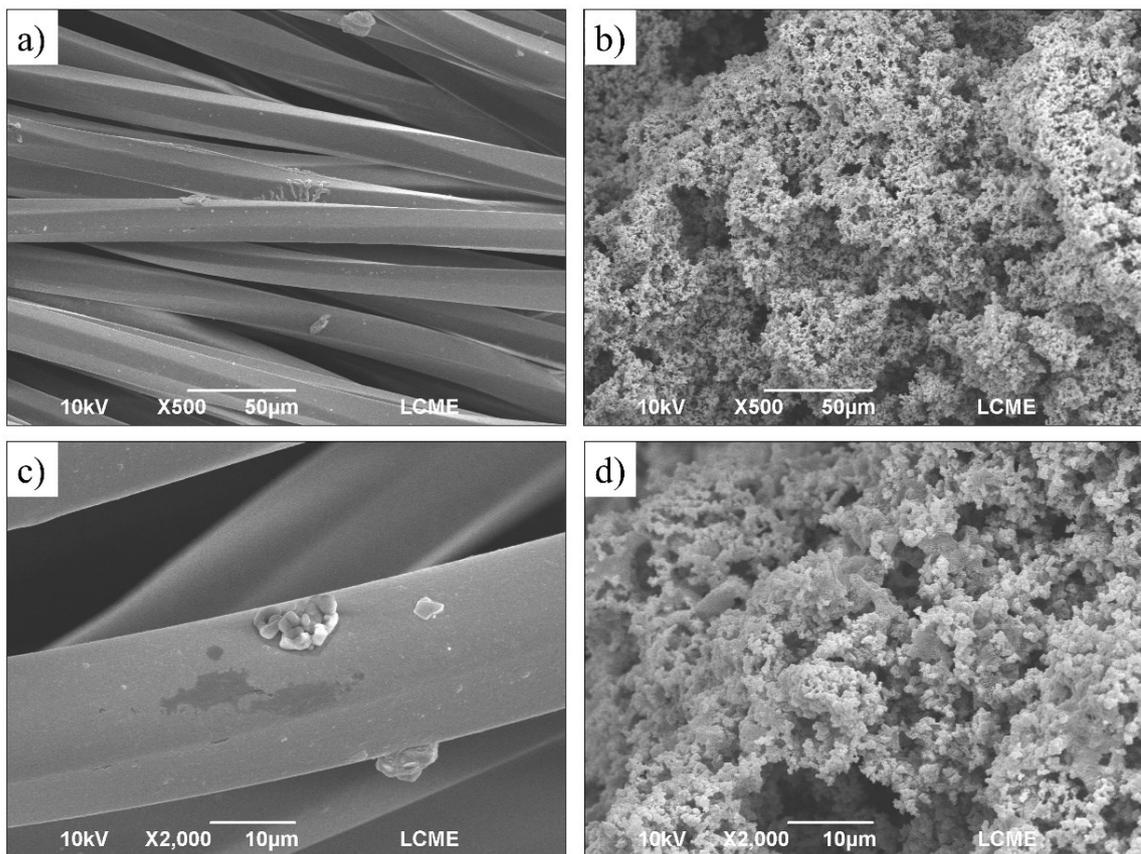
Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A característica de fio sintético de PES pode ser confirmada na Figura 23 a) e b), onde os filamentos são lisos e uniformes, sem a presença de *crimp* ou fibrilas, como aconteceria no caso de fibras de origem natural. Pode-se observar na Figura 23 a) e b) a presença de pequenos

aglomerados por entre os filamentos, que podem ser resíduos do processo de produção do fio (lubrificantes para melhor desempenho do fio nos teares) ou da produção de malha (decorrente do óleo utilizado no tear), ou ainda, a formação de trímeros e oligômeros que são formados no processo de polimerização e acabam ficando posteriormente na superfície do filamento de poliéster. Estes parâmetros são característicos do processo e não prejudicam o processo de polimerização.

Ainda, verificou-se que o polipirrol se apresenta na forma de nanopartículas, formando aglomerados porosos, recobrendo todo o filamento de PES, conforme visto na Figura 23 b). O PPy revestiu toda a superfície polimérica e se aderiu aos fios e a si próprio, formando pequenos aglomerados (Figura 23 d)).

Figura 23 – MEV das malhas jersey (a) e (c) sem PPy; b) (b) e (d) com PPy; d) ampliação de 2000x com PPy.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

As malhas contendo PPy foram avaliadas quanto à sua espessura, obtendo-se valores médios de $2,6 \pm 0,02$ mm para as amostras de estrutura jersey (48,8% mais espessas do que sem

o PPy) e de $3,7 \pm 0,02$ mm para as amostras de piqué (31% mais espessas do que sem o PPy), conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Espessura das malhas com polipirrol

Amostras	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Desvio padrão
Jersey A	3,0	$2,6 \pm 0,02$	0,3
Jersey B	2,7		
Jersey C	2,4		
Jersey D	2,3		
Jersey E	2,7		
Piqué A	4,3	$3,7 \pm 0,02$	0,4
Piqué B	3,7		
Piqué C	3,5		
Piqué D	3,8		
Piqué E	3,3		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Foram realizados ensaios de gramatura nas malhas com polipirrol, e foi observado que as amostras jersey com PPy obtiveram gramatura $338,4 \pm 0,01$ g/m² (169% maior do que as amostras sem o PPy), e as malhas piqué com PPy, apresentaram gramatura $370,4 \pm 0,01$ g/m² (133% maior do que as amostras sem o PPy). Ressalta-se que, o elevado desvio padrão nestas amostras se dá pelo fato de não existir uma padronização na quantidade de polipirrol que é transferida do banho para a amostra de malha, o que ocasiona amostras contendo maior quantidade de polipirrol – e conseqüente maior massa – e amostras contendo menor quantidade de polipirrol. Os dados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Gramatura das malhas com polipirrol

Amostra	Massa (g)	Gramatura (g/m ²)	Gramatura média (g/m ²)	Desvio padrão
Jersey A	0,9	360	$338,4 \pm 0,01$	50,3
Jersey B	0,9	348		
Jersey C	1,0	396		
Jersey D	0,7	260		
Jersey E	0,8	328		
Piqué A	0,9	368	$370,4 \pm 0,01$	48,5
Piqué B	1,0	388		
Piqué C	0,7	292		

Amostra	Massa (g)	Gramatura (g/m²)	Gramatura média (g/m²)	Desvio padrão
Piqué D	1,1	424		
Piqué E	1,0	380		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As amostras foram comparadas em relação ao seu ganho de massa após o processo de polimerização nas malhas, avaliando os dados das Tabelas 3 e 6. A diferença média de massa das amostras foi em torno de 0,53 g/m², conforme dados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Diferença de massa após processo de polimerização

Amostra	Massa sem PPy (g)	Massa com PPy (g)	Diferença de massa (g)
Jersey A	0,3	0,9	0,6
Jersey B	0,3	0,9	0,6
Jersey C	0,3	1,0	0,7
Jersey D	0,3	0,7	0,3
Jersey E	0,3	0,8	0,5
Piqué A	0,4	0,9	0,5
Piqué B	0,4	1,0	0,6
Piqué C	0,4	0,7	0,3
Piqué D	0,4	1,1	0,6
Piqué E	0,4	1,0	0,6

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

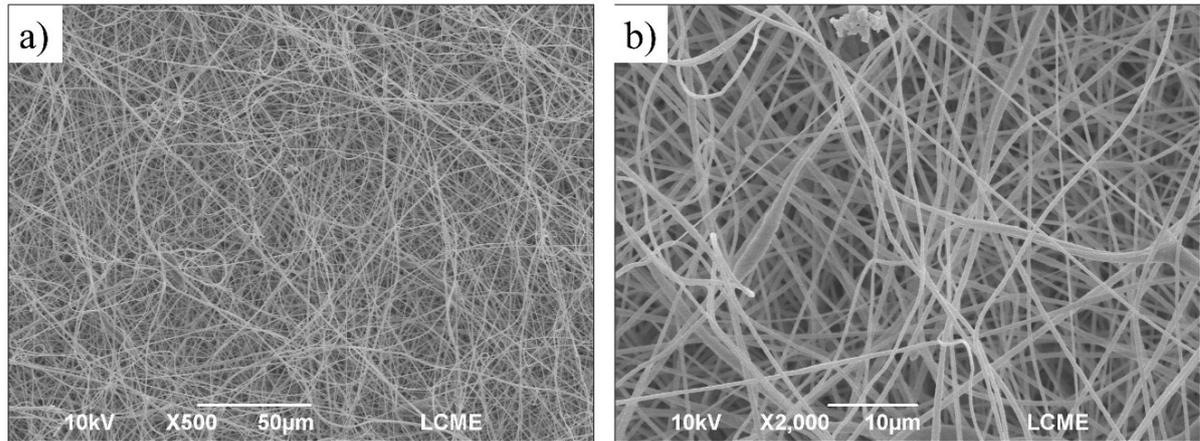
Com base na Tabela 7, entende-se que as malhas submetidas ao processo de polimerização *in situ* de PPy obtiveram um aumento na sua massa devido a deposição do mesmo. Esta mudança na massa das amostras é significativa, e pode prejudicar o desempenho do dispositivo, partindo do princípio de que quanto maior a leveza, ou seja, menor a rigidez do material têxtil, mais fácil será sua movimentação, e para um têxtil piezoelétrico, deseja-se um material de fácil movimentação para assim, obter maior desempenho da piezoelectricidade.

4.3 DESENVOLVIMENTO DE NÃOTECIDO DE PVDF POR ELETROFIAÇÃO

As amostras do nãotecido de PVDF foram analisadas quanto à sua morfologia, apresentando filamentos com diâmetro médio de 561 nanômetros (0,561 μm), obtido com auxílio do *software* ImageJ. Conforme pode ser observado na Figura 24 a) e b), os nãotecidos de PVDF possuem filamentos uniformes sem a presença de *beads*. Além disso, as fibras

dispostas no nãotecido não possuem orientação pré-definida, característico do processo de eletrofiação.

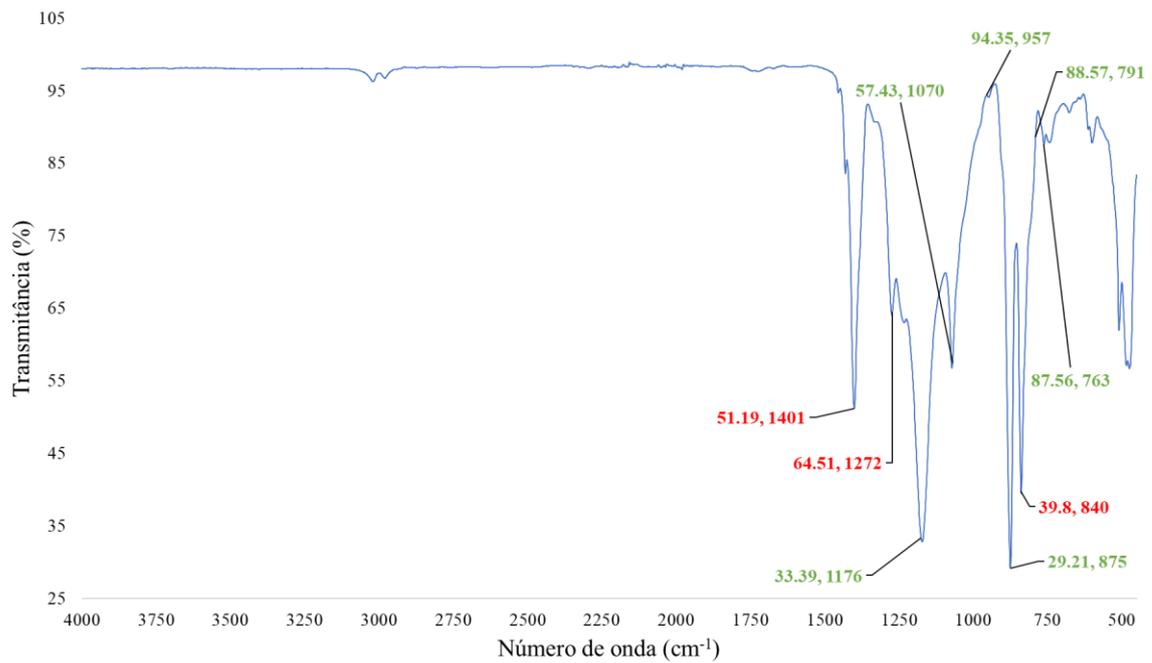
Figura 24 – MEV do nãotecido de PVDF.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

As amostras de nãotecido de PVDF foram analisadas por FTIR, para verificação da sua fase β . Podem ser observados os picos característicos da fase α que são: 763, 791, 875, 957, 1070 e 1176 cm^{-1} , e os picos referentes a fase β : 840, 1272 e 1401, resultados similares aos apresentados em literatura prévia (AKSOY; HASAR, 2021). Vale ressaltar que a confirmação da fase β em um polímero para aplicações piezoelétricas é excelente, pois, é nesta fase em que o polímero apresenta as mais elevadas características piezoelétricas, ou seja, pode-se afirmar que o processo realizado permite a produção de nãotecidos com característica de piezoelectricidade (SCHIEFFERDECKER et al., 2019). Os picos podem ser observados na Figura 25.

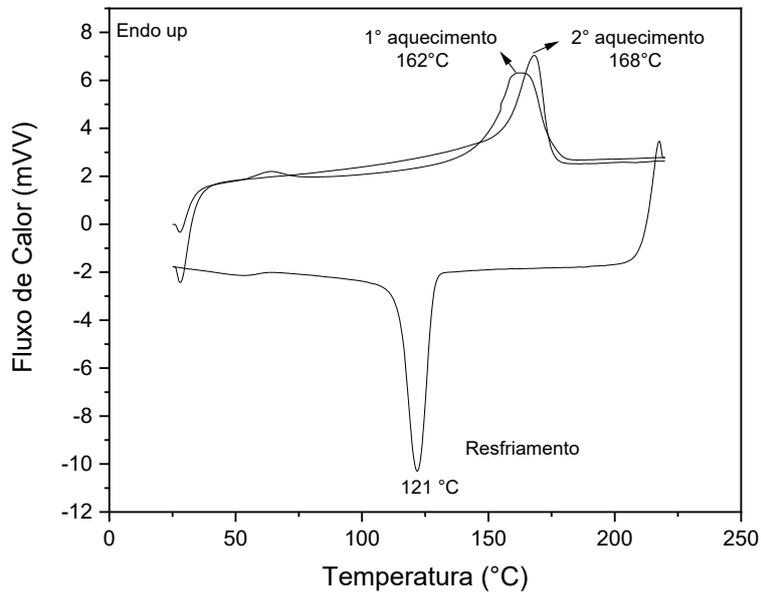
Figura 25 – FTIR do nãotecido de PVDF.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

As amostras de nãotecido de PVDF foram analisadas em relação à sua temperatura de fusão e de cristalização via técnica de DSC, com eventos térmicos de primeira ordem. A partir dos dados encontrados (Figura 26), pode-se observar que a temperatura de fusão (pico endotérmico) do PVDF é entre 162 e 168 °C, e sua temperatura de cristalização (pico exotérmico) é de 121 °C.

Figura 26 – Análise de DSC do nãotecido de PVDF.

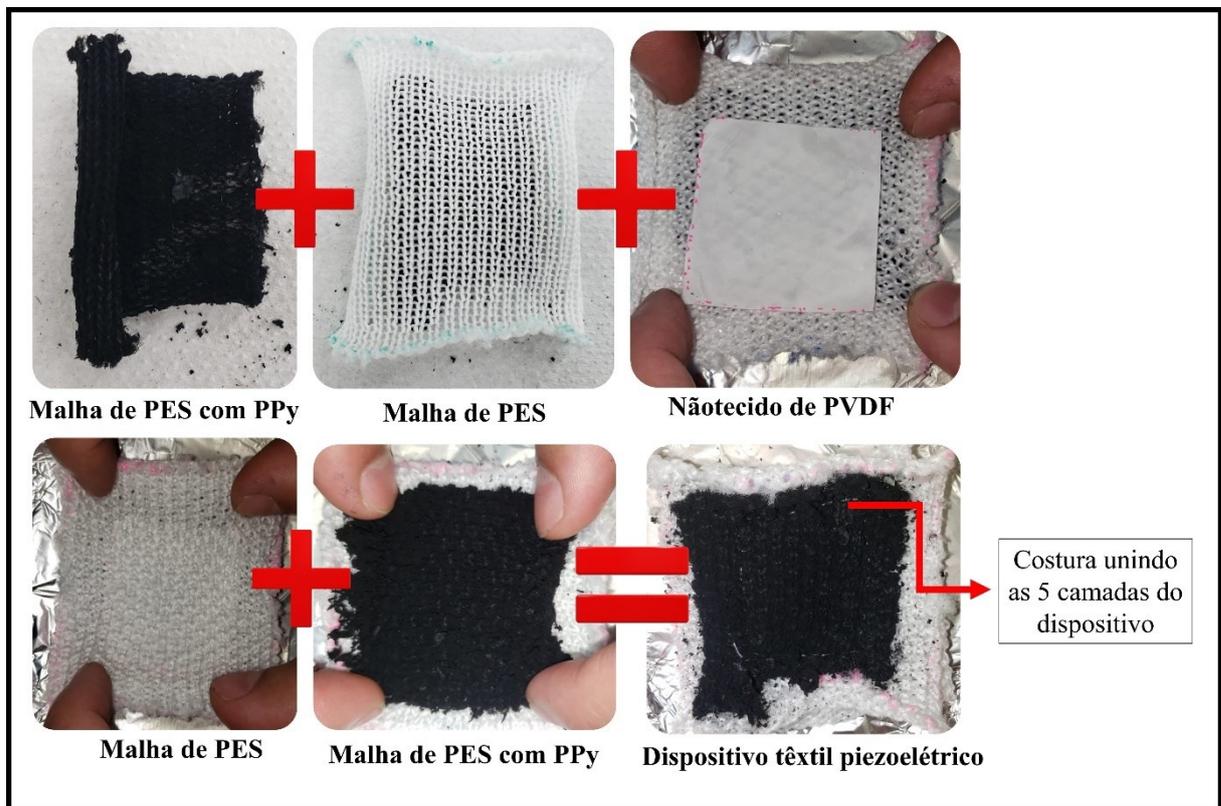


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.4 CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO TÊXTIL PIEZOELÉTRICO

A construção do dispositivo têxtil piezoelétrico se deu pelo auxílio de máquina de costura, e o processo de montagem pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Processo de construção do dispositivo têxtil piezoelétrico.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O dispositivo têxtil piezoelétrico foi avaliado em relação à sua espessura, conforme pode ser observado na Tabela 8. Dessa forma, quando se compara as duas estruturas de malha, os dispositivos que contêm as estruturas piqué apresentaram maior espessura em relação às estruturas jersey (19,2% mais espessas).

Tabela 8 – Espessura do dispositivo têxtil piezoelétrico

Amostras	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Desvio padrão
Jersey A	6,5		
Jersey B	5,5		
Jersey C	5,5	5,2 ± 0,02	1,0
Jersey D	4,5		
Jersey E	4,0		
Piqué A	6,0		
Piqué B	6,0		
Piqué C	5,5	6,2 ± 0,02	0,8
Piqué D	7,5		

Amostras	Espessura (mm)	Espessura média (mm)	Desvio padrão
Piqué E	6,0		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O material piezoelétrico construído foi avaliado em termos de sua gramatura, utilizando a massa do dispositivo, em gramas, e a área do dispositivo, em m². Para isso, foi realizado cálculo de área de cada uma das 5 partes constituintes, e as áreas foram somadas. Assim, conforme observado na Tabela 9, o dispositivo formado pelas amostras de malha piqué, apresentam gramatura em torno de 30,6% mais elevada do que as amostras contendo as malhas jersey em sua construção.

Tabela 9 – Gramatura do dispositivo têxtil piezoelétrico

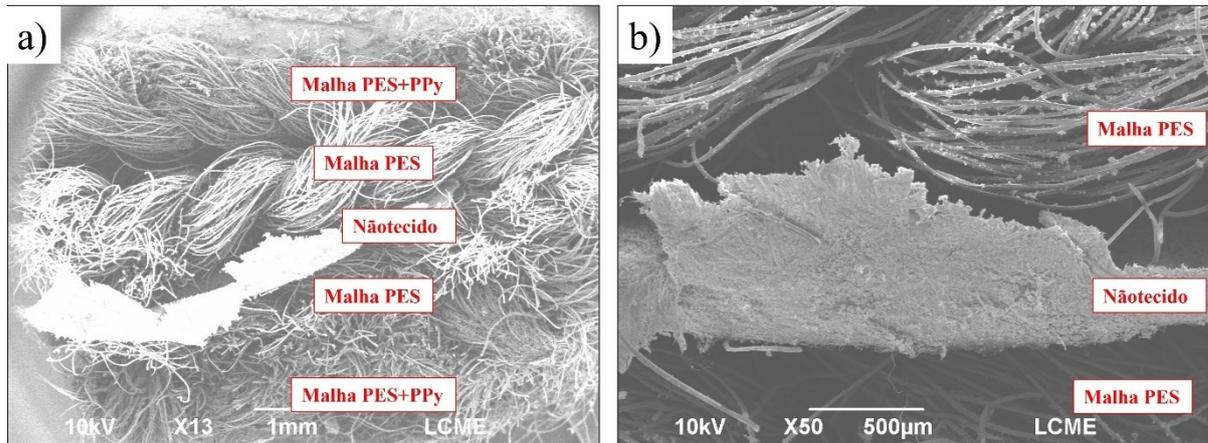
Amostras	Massa (g)	Gramatura (g/m²)	Gramatura média (g/m²)	Desvio padrão
Jersey A	3,0	166,9		
Jersey B	3,9	221,4		
Jersey C	3,9	220,8	213,5 ± 0,01	28,3
Jersey D	3,8	214,6		
Jersey E	4,3	243,8		
Piqué A	4,0	222,5		
Piqué B	3,9	216,9		
Piqué C	4,9	276,4	278,9 ± 0,01	66,7
Piqué D	6,8	380,9		
Piqué E	5,3	297,8		

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As amostras do dispositivo foram analisadas quanto à sua morfologia em relação à adesão das camadas entre si, e pode-se observar que as camadas têxteis não possuem adesão entre si, ou seja, não estão conectadas firmemente umas às outras. Este resultado era esperado, pois durante a fabricação deste dispositivo não se utilizou nenhum material ligante, solvente ou qualquer processo adicional, com aumento de temperatura, por exemplo, para tornar as camadas do material conectadas fortemente entre si.

No entanto, a fim de garantir que o dispositivo não irá se desconstruir ou se desfazer durante o manuseio, este foi costurado para “prender” as camadas umas às outras. Os resultados podem ser observados na Figura 28 a) e b), em diferentes magnitudes.

Figura 28 – MEV do dispositivo têxtil piezoelétrico.



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

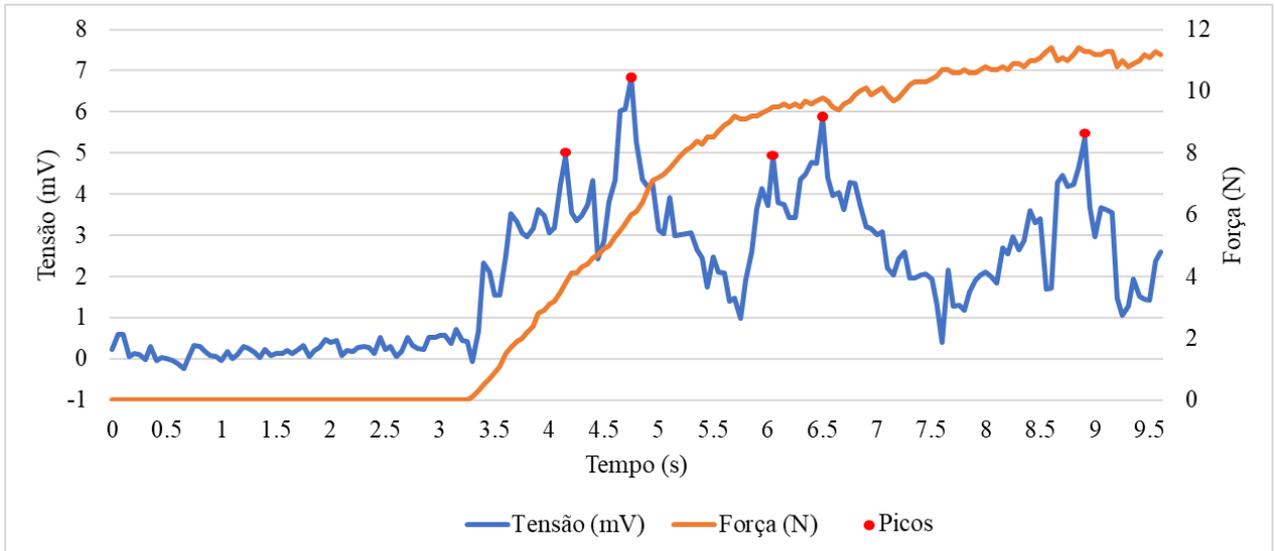
O dispositivo têxtil piezoelétrico foi ensaiado em relação à sua resposta piezoelétrica, quando submetido à uma força (N) de três diferentes maneiras: aplicando-se força na direção das carreiras das malhas que compõem o dispositivo; na direção das colunas das malhas que compõem o dispositivo; e aplicando-se pressão sobre as amostras. A aplicação da força para estes três diferentes métodos mencionados, foram aplicadas manualmente, e os resultados foram discutidos a partir dos dados obtidos pelo sensor de força presente no equipamento utilizado para estas medições. Nestes ensaios, os dispositivos desenvolvidos com malhas jersey e piqué foram analisados separadamente, e as forças manualmente aplicadas aos dispositivos se encontram entre o intervalo de 24 a 52 repetições.

O dispositivo elaborado com a estrutura jersey apresentou comportamento piezoelétrico ilustrado na Figura 29. Nota-se que, quando não há força aplicada na amostra, há pouca existência de tensão (que pode ser caracterizada como ruído, por exemplo), e a partir do momento em que a amostra é estimulada com movimento na direção das carreiras, o dispositivo executa uma resposta elétrica.

No entanto, conforme houve um aumento da força aplicada na amostra, a diferença de potencial observada não é constante, e nem linearmente correlata com a força aplicada. Este fato pode ter ocorrido devido ao método utilizado para a realização do ensaio, que foi manual, ou ainda, pelo fato de que a polimerização do pirrol nas amostras de malha deixou-as rígidas em excesso em alguns pontos, e esta rigidez pode ter causado uma resistência ao movimento do dispositivo. Somente após um determinado período de aplicação de força na amostra, esta

pode ter “desprendido” as laçadas da rigidez ocasionada pelo PPy, o que contribuiria para a presença de picos de diferença de potencial registrados, conforme ilustrado na Figura 29.

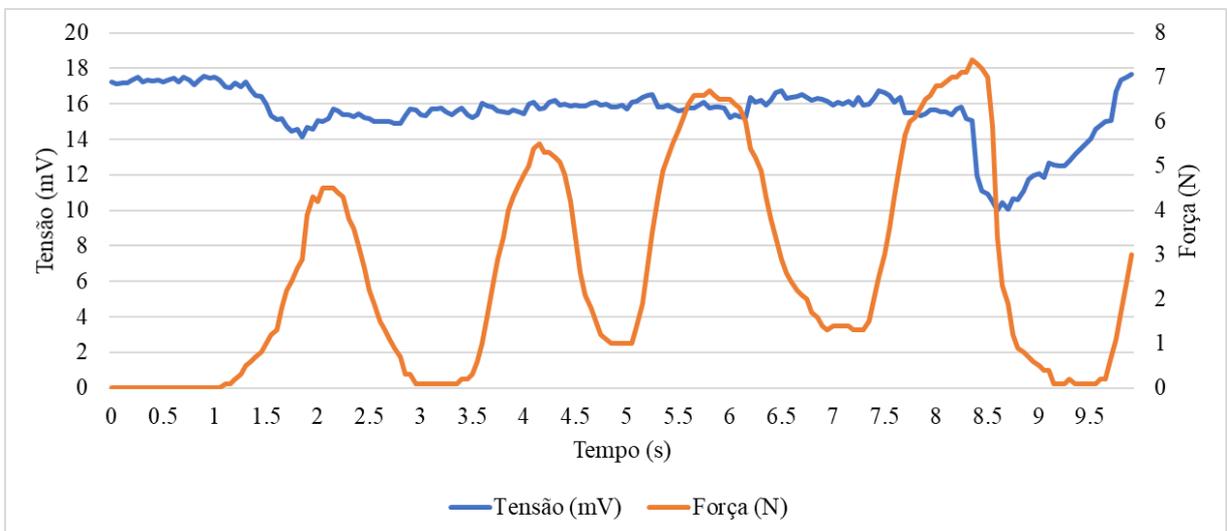
Figura 29 – Dispositivo jersey com força aplicada na direção das carreiras.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Analisando as amostras de jersey submetidas a ensaio de força aplicada na direção das colunas, observa-se uma provável tensão residual de possível maneira capacitiva no dispositivo, que pode ter se dado devido ao manuseio. No entanto, pode-se perceber uma alteração correlata da diferença de potencial e força entre os tempos 7,5 e 8,7s, conforme observado na Figura 30.

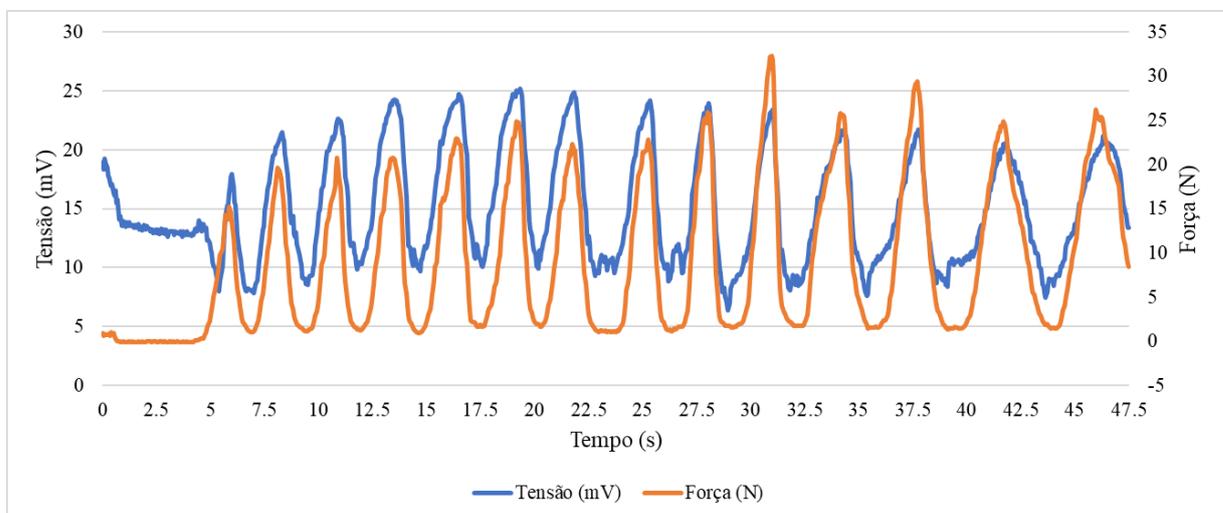
Figura 30 – Dispositivo jersey com força aplicada na direção das colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Os ensaios realizados a partir da aplicação de pressão inserido no dispositivo, mostraram que a amostra teve início com um pouco de tensão residual, e as excitações começaram a partir do tempo 5,75s, com bandas correspondentes ao efeito piezoelétrico, ou seja, existe uma tensão de resposta quando aplicada uma força ao dispositivo, e quando esta força diminui, a tensão de resposta também diminui. O dispositivo originou estes dados ao longo de 47,5s, apresentando ciclos correspondentes durante este período, conforme Figura 31.

Figura 31 – Jersey com pressão aplicada.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

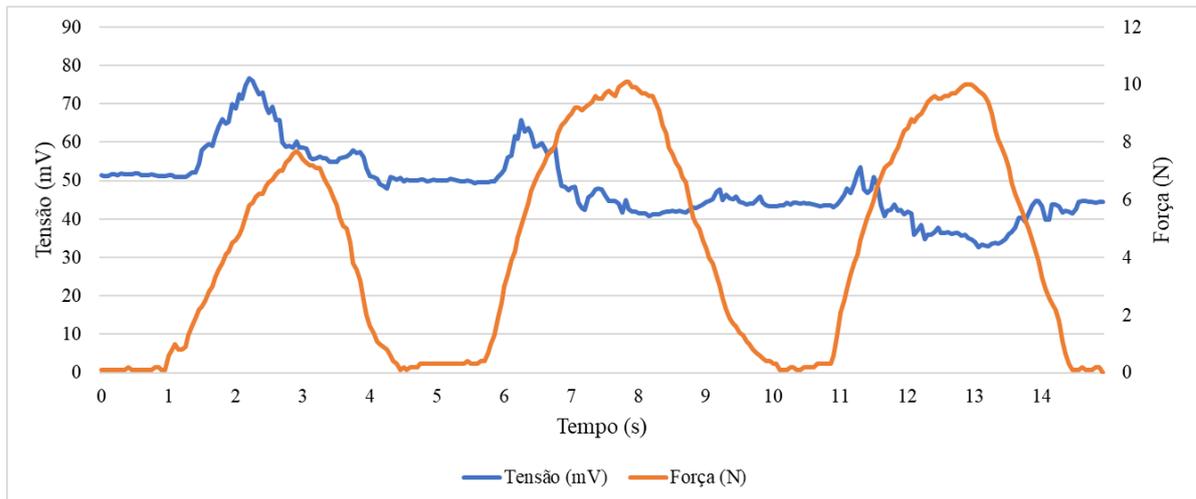
As amostras dos dispositivos construídos com malhas jersey possuem resultados distintos entre si pois devido as diferentes forças aplicadas. Além disso, estas malhas apresentam comportamento distinto de elasticidade em sua largura e no seu comprimento, devido à sua geometria de formação.

Em seguida, foram iniciados os testes com os dispositivos construídos baseados na estrutura piqué, submetidos à ensaios de força aplicada na direção das carreiras. Pode-se observar na Figura 32, analisando os dados de força e de diferença de potencial, nota-se uma resposta inicial de tensão (até o tempo 6,5s) que confirma um padrão correlato, porém não permanece após este tempo.

A estrutura do tipo piqué possui uma maior resistência ao movimento na direção das carreiras devido à sua formação (construção de pontos), o que pode ter colaborado com o

resultado obtido. Além disso, o dispositivo formado pela estrutura piqué possui elevada espessura, o que pode ter dificultado o manuseio da amostra durante a realização do teste.

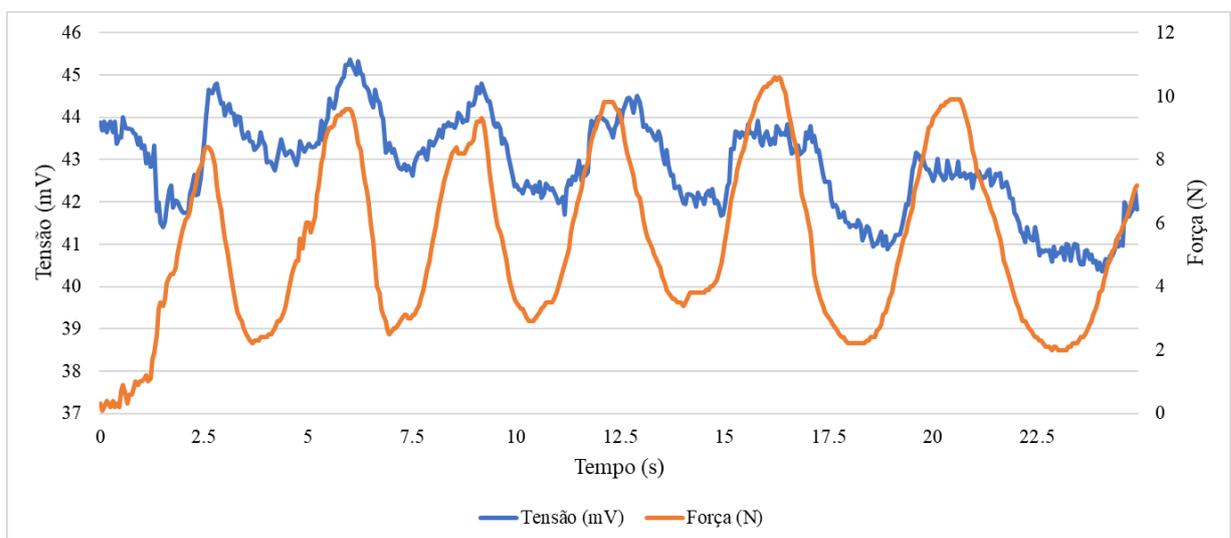
Figura 32 – Piqué com força aplicada na direção das carreiras.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

As amostras do dispositivo piqué testadas em relação à força aplicada na direção das colunas apresentaram comportamento de curvas correspondente, ou seja, conforme a força aumenta, a diferença de potencial percebida também aumenta, porém, a variação da diferença de potencial encontrada neste ensaio foi em torno de 2 mV, como pode ser observado na Figura 33.

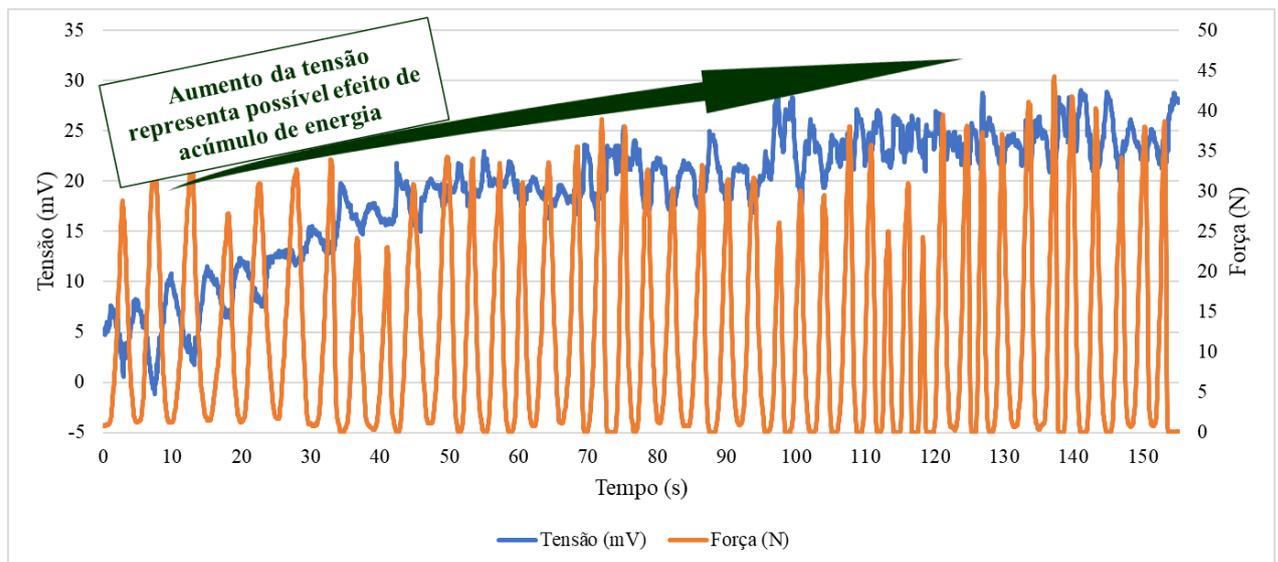
Figura 33 – Piqué com força aplicada na direção das colunas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Por fim, as amostras foram ensaiadas em relação à pressão aplicada no dispositivo construído com malhas do tipo piqué. Conforme apresenta a Figura 34, a resposta elétrica do dispositivo é confirmada, mas pode-se também observar que existe uma tensão capacitiva acumulada na amostra, percebida pela curva crescente da tensão.

Figura 34 – Piqué com pressão aplicada.



Fonte: Elaborado pela autora (2022)

Os dispositivos elaborados com as malhas de estrutura piqué possuem resultados diferentes pois foram submetidos à distintas forças aplicadas nas amostras. Além disso, as malhas apresentam diferentes características de elasticidade, tanto na direção da largura como no comprimento, o que oferece ao dispositivo distintos resultados de mobilidade.

Em termos de comparações dos dispositivos, nota-se que o dispositivo preparado com malhas jersey se mostrou com melhor resultado piezoelétrico nos testes com força aplicada na direção das carreiras e no ensaio de pressão, do que o dispositivo em piqué. Este fato pode ser justificado pelo coeficiente de correlação entre as curvas de tensão e diferença de potencial entre as estruturas jersey e piqué, o qual obtêm-se um coeficiente de correlação para o jersey de 0,3 e para o piqué de -0,1, para o ensaio na direção das carreiras; e coeficiente de correlação de 0,7 no jersey e -0,2 para piqué, em ensaios de pressão aplicada. Dessa forma, sabe-se que a característica piezoelétrica é decorrente da correlação entre as curvas mencionadas. Portanto, o dispositivo elaborado com malhas jersey obteve melhor efeito piezoelétrico.

Nos ensaios de força aplicada na direção das colunas, as amostras construídas com piqué apresentaram melhor desempenho, o que se dá devido à sua estrutura conter laçadas carregadas, permitindo maior movimentação da malha neste sentido. Ou seja, o coeficiente de correlação neste ensaio para o piqué foi de 0,04 e de -0,2 para o jersey.

No entanto, a adição do PPy pelo método de polimerização *in situ* nas amostras de malha, de ambas as estruturas, deixaram-nas um pouco rígidas devido a maior concentração de PPy e partes menos rígidas (menor concentração de PPy). Este fato pode ter influenciado na movimentação das amostras, ou seja, a rigidez em pequenos pontos pode ter gerado uma resistência ao movimento, e conseqüentemente uma resistência à resposta elétrica do dispositivo elaborado.

Com isso, pode-se comparar os resultados obtidos neste estudo com alguns dados científicos previamente encontrados, quando se analisa a média da diferença de potencial obtida em ensaios de tensão *versus* força (Tabela 10).

Tabela 10 – Valores médios da diferença de potencial de amostras com propriedade piezoelétrica

Amostra/Material	Diferença de potencial média (V)	Referência
Material em camadas utilizando não tecido PVDF e poliéster	2,8 V	(YAHYAPOUR et al., 2021)
Filme multicamadas de PVDF e borracha de silicone	136 V	(YAHYAPOUR et al., 2021)
Material contendo não tecido de PVDF e malhas jersey forçadas na direção das carreiras	0,005 V	Este trabalho
Material contendo não tecido de PVDF e malhas jersey forçadas na direção das colunas	0,0019 V	Este trabalho
Material contendo não tecido de PVDF e malhas jersey forçadas por pressão	0,0013 V	Este trabalho

Amostra/Material	Diferença de potencial média (V)	Referência
Material contendo nãotecido de PVDF e malhas piqué forçadas na direção das carreiras	0,0029 V	Este trabalho
Material contendo nãotecido de PVDF e malhas piqué forçadas na direção das colunas	0,0020 V	Este trabalho
Material contendo nãotecido de PVDF e malhas piqué forçadas por pressão	0,0019 V	Este trabalho

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

No entanto, é importante ressaltar que o efeito piezoelétrico precisa ser analisado não apenas pela sua tensão média ou máxima obtida em um ensaio, mas sim, se esta tensão é correspondente à força aplicada na amostra durante a execução do teste. Ou seja, as curvas de tensão e força precisam estar correlatas para se ter, de fato, um material com característica piezoelétrica.

Por fim, os dados encontrados neste estudo caracterizam um dispositivo com propriedade piezoelétrica, uma vez que apresenta curvas correlatas entre tensão e força.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo confirmou o desenvolvimento das malhas por trama utilizando fios texturizados de poliéster, na construção das malhas do tipo jersey e piqué. A técnica de eletrofiação para o desenvolvimento de não tecidos foi escolhida com sucesso, apresentando fibras de diâmetro médio na ordem de $0,561\mu\text{m}$, e confirmando via FTIR a presença da fase β do polímero PVDF.

O processo de polimerização *in situ* apresentou boa formação do PPy na superfície das malhas e por entre os filamentos que compõem as mesmas. Porém, foi observado que este processo enrijeceu as amostras de ambas as estruturas têxteis.

A união das partes para a construção do dispositivo têxtil com comportamento piezoelétrico com auxílio de máquina de costura foi realizada com sucesso, tendo como resultado um material têxtil leve e com capacidade de movimentar-se quando da aplicação de uma força externa. Tal fato pode ser comprovado quando as amostras foram submetidas à ensaios estímulos externos de força aplicada, utilizando sensores de força e galvanômetro nas medições de força e diferença de potencial, respectivamente. Os ensaios permitiram a comparação do comportamento piezoelétrico e da resposta elétrica das diferentes estruturas utilizadas.

Comparando os dois grupos de malhas produzidas, verificou-se que as malhas jersey obtiveram menor gramatura e espessura, decorrentes da presença única de laçadas normais no raporte, apresentando, conseqüentemente melhor resposta elétrica nos testes de força e pressão aplicada na direção das carreiras. Enquanto os dispositivos de piqué apresentaram-se com maior gramatura, mais espessas (ambos decorrentes da presença de laçadas carregadas) e melhor resposta elétrica nos testes de força aplicada na direção das colunas, apresentando maior coeficiente de correlação entre as curvas de força e tensão, caracterizando o efeito piezoelétrico.

Assim, o presente trabalho confirma o desenvolvimento de dispositivos têxteis com comportamento piezoelétrico a partir da tecnologia de malharia por trama, utilizando filamentos texturizados de PES, a partir da união uma camada de não tecido de PVDF entre duas camadas isolantes e a seguir entre duas camadas condutoras externas de malhas contendo PPy nas extremidades.

Por fim, este estudo produziu e testou um dispositivo com característica piezoelétrica com sucesso, que é confirmada pelo padrão correlato de curvas de diferença de potencial e

força, ensaiadas nas amostras previamente citadas. Este dispositivo apresenta o potencial de ser aplicado na captação de energia (na grande área de energias renováveis, sustentabilidade), bem como em constituintes menores, como em cortinas, toldos flexíveis, vestuário, calçados, para diversos tipos de monitoramento.

6 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se:

A comparação do efeito piezoelétrico a partir da variação das condições de síntese do processo de polimerização do polipirrol.

Avaliação do comportamento piezoelétrico após submeter as amostras à esforços mecânicos, ou seja, a fadiga do material desenvolvido.

Estudo do limite máximo de temperatura em que este tipo de material consegue manter suas propriedades piezoelétricas.

Comparação de demais estruturas de malha, analisando a influência de pontos flutuantes, por exemplo e de estruturas produzidas em teares duplafrontura.

Realização de ensaios automatizados a fim de obter-se maior precisão dos dados e da característica piezoelétrica das amostras.

REFERÊNCIAS

A.C. LOPES, P. M.; S. LANCEROS-MENDEZ. Polímeros piezoelétricos: características, aplicações, perspectivas. **Gazeta de Física**, v. 37, n. 3, p. 2–7, 2014.

ABAVISANI, I.; REZAIFAR, O.; KHEYRODDIN, A. Multifunctional properties of shape memory materials in civil engineering applications: A state-of-the-art review. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102-657, 2021.

ABREU, F. G. ANÁLISE DE POLIFLUORETO DE VINILIDENO (PVDF) SOB CARREGAMENTO CÍCLICO. **Dissertação de Mestrado**, p. 1–139, 2012.

AHMAD, S.; RASHEED, A.; NAWAB, Y. **Fibers for Technical Textiles**. Editora Springer, p. 1-227, 2020.

AKBAR SHAH, M. et al. Applications of Nanotechnology in Smart Textile Industry: A Critical Review. **Journal of Advanced Research**, 2022.

AKSOY, Y.; HASAR, H. Fabrication of gas-permeable polyvinylidene fluoride (PVDF) hollow-fiber membrane by dry-jet wet spinning and its application in membrane biofilm reactors. **Journal of Water Process Engineering**, v. 40, 2021.

ALI, B.; ASHRAF, M. W.; TAYYABA, S. Simulation, fuzzy analysis and development of ZnO nanostructure-based piezoelectric MEMS energy harvester. **Energies**, v. 12, n. 5, 2019.

ALMUSALLAM, A. et al. Flexible piezoelectric nano-composite films for kinetic energy harvesting from textiles. **Nano Energy**, v. 33, p. 146–156, 2017.

ANDO, M. et al. Electric antibacterial effect of piezoelectric poly(lactic acid) fabric. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 58, n. SL, 2019.

ANDREADES, C.; MAHMOODI, P.; CIAMPA, F. Characterisation of smart CFRP composites with embedded PZT transducers for nonlinear ultrasonic applications. **Composite Structures**, v. 206, p. 456–466, 2018.

AQUINO, M. et al. An evaluation and characterization study of knitted fabrics for use as telecommunication device substrate. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 2076–2084, 2021.

ASYRAF, M. et al. Recent Development of Nanomaterial-Doped Conductive Polymers. **Jom**, v. 69, n. 12, p. 2515–2523, 2017.

AU, K. F. **Advances in Knitting Technology**. Woodhead Publishing, 2011.

BADARAEV, A. D. et al. Piezoelectric polymer membranes with thin antibacterial coating for the regeneration of oral mucosa. **Applied Surface Science**, v. 504, p. 144-068, 2020.

BAIRAGI, S.; ALI, S. W. A unique piezoelectric nanogenerator composed of melt-spun PVDF/KNN nanorod-based nanocomposite fibre. **European Polymer Journal**, v. 116, p. 554–561, 2019.

CARVALHO, R.; FERNANDES, M.; FANGUEIRO, R. The influence of cork on the thermal insulation properties of home textiles. **Procedia Engineering**, v. 200, p. 252–259, 2017.

CHA, Y.; NAM, K.; KIM, D. Patient posture monitoring system based on flexible sensors. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 3, p. 1–11, 2017.

CHAKHCHAOU, N. et al. Improvement of the electroactive b-phase nucleation and piezoelectric properties of PVDF-HFP thin films influenced by TiO₂ nanoparticles. **Materials Today: Proceedings**, v. 39, p. 1148–1152, 2019.

CHEN, G. et al. Smart Textiles for Electricity Generation. **Chemical Reviews**, 2020.

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

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, 2020.

DAS, S. **Performance of home textiles**. Woodhead publishing, 2010.

DELAVARI, K.; DABIRYAN, H. Mathematical and numerical simulation of geometry and mechanical behavior of sandwich composites reinforced with 1×1-Rib-Gaiting weft-knitted spacer fabric; compressional behavior. **Composite Structures**, v. 268, p. 113-952, 2021.

ERTURK, A.; INMAN, D. J. **Piezoelectric Energy Harvesting**. Editora Wiley, p. 1-416, 2011.

EWA KORZENIEWSKA, ANDRZEJ KRAWCZYK, JÓZEF MRÓZ, E. W. NSKA; ZAWISLAK, R. Applications of Smart Textiles in Post-Stroke Rehabilitation. **Sensors**, p. 1–12, 2020.

FAROOQ, A. S.; ZHANG, P. Fundamentals, materials and strategies for personal thermal management by next-generation textiles. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 142, p. 106-249, 2021.

FARUK, M. O. et al. Functional textiles and composite based wearable thermal devices for Joule heating: progress and perspectives. **Applied Materials Today**, v. 23, p. 101-025, 2021.

FENG, Q.; OU, J. Self-sensing CFRP fabric for structural strengthening and damage

detection of reinforced concrete structures. **Sensors (Switzerland)**, v. 18, n. 12, 2018.

FERRI, A. et al. Local Electrical Characterization of PVDF Textile Filament. **Fibers and Polymers**, v. 20, n. 7, p. 1333–1339, 2019.

GARCIA, P. S. et al. Improving action of citric acid as compatibiliser in starch/polyester blown films. **Industrial Crops and Products**, v. 52, p. 305–312, 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**, p. 1–12, 2020.

GEE, S.; JOHNSON, B.; SMITH, A. L. Optimizing electrospinning parameters for piezoelectric PVDF nano fiber membranes. **Journal of Membrane Science**, v. 563, n. February, p. 804–812, 2018.

GHOSH, S. K. et al. Electrospun gelatin nanofiber based self-powered bio-e-skin for health care monitoring. **Nano Energy**, v. 36, p. 166–175, 2017.

GHOSH, S. K.; MANDAL, D. Synergistically enhanced piezoelectric output in highly aligned 1D polymer nanofibers integrated all-fiber nanogenerator for wearable nano-tactile sensor. **Nano Energy**, v. 53, p. 245–257, 2018.

GRANCARIĆ, A. M. et al. **Conductive polymers for smart textile applications**. Journal of Industrial Textiles, 2017.

GRYSHKOV, O. et al. PvdF and p(Vdf-trfe) electrospun scaffolds for nerve graft engineering: A comparative study on piezoelectric and structural properties, and in vitro biocompatibility. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 21, p. 1–27, 2021.

GUERIN, S.; TOFAIL, S. A. M.; THOMPSON, D. Organic piezoelectric materials: milestones and potential. **NPG Asia Materials**, v. 11, n. 1, p. 1–5, 2019.

GUO, Y. et al. All-fiber hybrid piezoelectric-enhanced triboelectric nanogenerator for wearable gesture monitoring. **Nano Energy**, v. 48, p. 152–160, 2018.

HAO, D.; XU, B.; CAI, Z. Polypyrrole coated knitted fabric for robust wearable sensor and heater. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 29, n. 11, p. 9218–9226, 2018.

HARITO, C. et al. Review—The Development of Wearable Polymer-Based Sensors: Perspectives. **Journal of The Electrochemical Society**, 2020.

HE, H. et al. A flexible self-powered T-ZnO/PVDF/fabric electronic-skin with multi-functions of tactile-perception, atmosphere-detection and self-clean. **Nano Energy**, v. 31, p. 37–48, 2017a.

HE, Q. et al. P–N junction-based ZnO wearable textile nanogenerator for biomechanical energy harvesting. **Nano Energy**, v. 85, p. 105–938, 2021.

HE, S. et al. Piezoelectric thin film on glass fiber fabric with structural hierarchy: An approach to high-performance, superflexible, cost-effective, and large-scale nanogenerators. **Nano Energy**, v. 59, p. 745–753, 2019.

HE, W. et al. Synthesis of ultra-thin tellurium nanoflakes on textiles for high-performance flexible and wearable nanogenerators. **Applied Surface Science**, v. 392, p. 1055–1061, 2017b.

HERNÁNDEZ-NAVARRO, N. et al. Electrospun polyvinylidene fluoride nanofibers by bubble electrospinning technique. **Materials Letters**, v. 167, p. 34–37, 2016.

HOFMANN, P. et al. Woven piezoelectric sensors as part of the textile reinforcement of fiber reinforced plastics. **Composites Part A**, v. 116, p. 79–86, 2019.

HUANG, T. et al. Human walking-driven wearable all-fiber triboelectric nanogenerator containing electrospun polyvinylidene fluoride piezoelectric nanofibers. **Nano Energy**, v. 14, p. 226–235, 2015.

HWANG, Y. J.; CHOI, S.; KIM, H. S. Physical Highly flexible all-nonwoven piezoelectric generators based on electrospun poly (vinylidene fluoride). **Sensors & Actuators: A. Physical**, v. 3, p. 111-672, 2019.

J. LOPES DA SILVA; V. SÁ DA COSTA; A. M. FREIRE. Polímeros condutores. **Boletim da Sociedade Portuguesa de Química**, p. 44, 1986.

JALIL, W. D. A. Smart textiles for the architectural façade. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 737, n. 1, 2020.

JEONG, K. et al. Effect of processing parameters of the continuous wet spinning system on the crystal phase of PVDF fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 135, n. 3, p. 1–9, 2018.

JESIONEK, M. et al. Fabrication of a new PVDF / SbSI nanowire composite for smart wearable textile. **Polymer**, v. 180, p. 121-729, 2019.

JI, S. H.; CHO, Y. S.; YUN, J. S. Wearable core-shell piezoelectric nanofiber yarns for body movement energy harvesting. **Nanomaterials**, v. 9, n. 4, p. 1–9, 2019.

JIANG, C. et al. Application of textile technology in tissue engineering: A review. **Acta Biomaterialia**, 2021.

JUNG, K. C.; CHANG, S. H. Performance evaluation of smart grid fabrics comprising carbon dry fabrics and PVDF ribbon sensors for structural health monitoring. **Composites Part B: Engineering**, v. 163, p. 690–701, 2019.

KARPPINEN, S.; KALLUNKI, V.; KOMULAINEN, K. Interdisciplinary craft designing and invention pedagogy in teacher education: student teachers creating smart textiles.

International Journal of Technology and Design Education, v. 29, n. 1, p. 57–74, 2019.

KHALIFA, M.; MAHENDRAN, A.; ANANDHAN, S. Synergism of graphitic-carbon nitride and electrospinning on the physico-chemical characteristics and piezoelectric properties of flexible poly(vinylidene fluoride) based nanogenerator. **Journal of Polymer Research**, v. 26, n. 3, 2019.

KHAN, H. et al. Sensitive and flexible polymeric strain sensor for accurate human motion monitoring. **Sensors (Switzerland)**, v. 18, n. 2, p. 1–10, 2018.

KIM, T. et al. Versatile nanodot-patterned Gore-Tex fabric for multiple energy harvesting in wearable and aerodynamic nanogenerators. **Nano Energy**, v. 54, p. 209–217, 2018.

KONCAR, V. **Smart textiles and their applications**. Woodhead publishing, 2016.

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

LEE, H. et al. Pure Piezoelectricity Generation by a Flexible Nanogenerator Based on Lead Zirconate Titanate Nanofibers. **ACS Omega**, v. 4, n. 2, p. 2610–2617, 2019.

LI, Y. et al. Multilayer assembly of electrospun/electrosprayed PVDF-based nanofibers and beads with enhanced piezoelectricity and high sensitivity. **Chemical Engineering Journal**, v. 388, 2020.

LIMA, P. H. C. et al. Polímeros condutores com propriedades eletrocromáticas: uma revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 13, n. 1, p. 1–17, 2018.

LIU, J. et al. Flexible and lead-free piezoelectric nanogenerator as self-powered sensor based on electrospinning BZT-BCT/P(VDF-TrFE) nanofibers. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 303, p. 111796, 2020.

LIU, L. et al. Piezoelectricity of PVDF composite film doped with dopamine coated nano-TiO₂. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 885, p. 160-829, 2021.

LU, L. et al. Flexible PVDF based piezoelectric nanogenerators. **Nano Energy**, v. 78, p. 105251, 2020a.

LU, L. et al. Electrospinning core-sheath piezoelectric microfibers for self-powered stitchable sensor. **Nano Energy**, v. 76, p. 104-966, 2020b.

LUND, A. et al. Electrically conducting fibres for e-textiles: An open playground for conjugated polymers and carbon nanomaterials. **Materials Science and Engineering R: Reports**, v. 126, p. 1–29, 2018.

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

MERLINI, C. et al. Development of a novel pressure sensing material based on polypyrrole-coated electrospun poly(vinylidene fluoride) fibers. **Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology**, v. 179, n. 1, p. 52–59, 2014a.

MERLINI, C. et al. The effect of compressive stress on the electrically resistivity of poly(vinylidene fluoride)/polypyrrole blends. **Synthetic Metals**, v. 196, p. 186–192, 2014b.

MERLINI, C. DESENVOLVIMENTO DE MEMBRANAS ELETROFIADAS DE POLI (FLUORETO DE VINILIDENO) COM POLIPIRROL PARA APLICAÇÃO EM SENSORES DE COMPRESSÃO. **Tese em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina**, n. September, p. 1–171, 2014.

NEZAKATI, T. et al. Conductive Polymers: Opportunities and Challenges in Biomedical Applications. **Chemical Reviews**, v. 118, n. 14, p. 6766–6843, 2018.

PARK, S. et al. Poling-free spinning process of manufacturing piezoelectric yarns for textile applications. **Materials & Design**, v. 179, p. 107–889, 2019.

PONNAMMA, D. et al. Smart and robust electrospun fabrics of piezoelectric polymer nanocomposite for self-powering electronic textiles. **Materials & Design**, v. 184, p. 108–176, 2019.

POPLI, S. A.; PATEL, U. D. Electrochemical decolorization 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.

PROTO, A. et al. Nanogenerators for Human Body Energy Harvesting. **Trends in Biotechnology**, v. 35, n. 7, p. 610–624, 2017.

PROVIN, A. P. et al. New materials for clothing: Rethinking possibilities through a sustainability approach - A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 282, p. 124–444, 2021.

RAMLOW, H.; ANDRADE, K. L.; IMMICH, A. P. S. Smart textiles: an overview of recent progress on chromic textiles. **Journal of the Textile Institute**, v. 112, n. 1, p. 152–171, 2021.

RAY, S. C. **Fundamentals and advances in knitting technology**. Woodhead publishing, 2011.

ROACH, D. J. et al. Long Liquid Crystal Elastomer Fibers with Large Reversible Actuation Strains for Smart Textiles and Artificial Muscles. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 11, n. 21, p. 19514–19521, 2019.

RONG, Q.; LEI, W.; LIU, M. Conductive Hydrogels as Smart Materials for Flexible Electronic Devices. **Chemistry - A European Journal**, v. 24, n. 64, p. 16930–16943, 2018.

ROUNDY, S.; TROLIER-MCKINSTRY, S. Materials and approaches for on-body

energy harvesting. **MRS Bulletin**, v. 43, n. 3, p. 206–213, 2018.

SCHIEFFERDECKER, V. DE M. et al. Comparative Study of the Structure and Properties of Poly(Vinylidene Fluoride)/Montmorillonite-Polypyrrole Nanocomposites Prepared by Electrospinning and Solution Casting. **Frontiers in Materials**, v. 6, p. 1–12, 2019.

SCHISCHKE, K.; NISSEN, N. F.; SCHNEIDER-RAMELOW, M. Flexible, stretchable, conformal electronics, and smart textiles: Environmental life cycle considerations for emerging applications. **MRS Communications**, v. 10, n. 1, p. 69–82, 2020.

SENCADAS, V. et al. Electroactive properties of electrospun silk fibroin for energy harvesting applications. **Nano Energy**, v. 66, p. 104–106, 2019.

SERRANO-GARCIA, W. et al. Nanocomposites for electronic applications that can be embedded for textiles and wearables. **Science China Technological Sciences**, v. 62, n. 6, p. 895–902, 2019.

SHEHATA, N. et al. Static-aligned Piezoelectric poly (Vinylidene Fluoride) electrospun nanofibers/MWCNT composite membrane: Facile method. **Polymers**, v. 10, n. 9, 2018.

SHETTY, S. et al. Polymorphism, dielectric and piezoelectric response of organo-modified Ni–Co layered double hydroxide nanosheets dispersed electrospun PVDF nanofabrics. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 30, n. 23, p. 20703–20715, 2019.

SHI, J.; AKBARZADEH, A. H. Architected cellular piezoelectric metamaterials: Thermo-electro-mechanical properties. **Acta Materialia**, v. 163, p. 91–121, 2019.

SINGH, R. K.; LYE, S. W.; MIAO, J. Holistic investigation of the electrospinning parameters for high percentage of β -phase in PVDF nanofibers. **Polymer**, v. 214, p. 123–366, 2021.

SINGHA, K.; KUMAR, J.; PANDIT, P. Recent Advancements in Wearable & Smart Textiles: An Overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 16, p. 1518–1523, 2019.

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

STYLIOS, G. K. Novel smart textiles. **Materials**, v. 13, n. 4, p. 10–12, 2020.

SURESH, S.; BECKER, A.; GLASMACHER, B. Impact of apparatus orientation and gravity in electrospinning—a review of empirical evidence. **Polymers**, v. 12, n. 11, p. 1–15, 2020.

TAGHIZADEH, A. et al. Conductive polymers in water treatment: A review. **Journal of Molecular Liquids**, v. 312, p. 113447, 2020.

THIERRY, V.; MESNIL, O.; CHRONOPOULOS, D. Experimental and numerical determination of the wave dispersion characteristics of complex 3D woven composites.

Ultrasonics, v. 103, p. 106-068, 2020.

TIWARI, S. et al. Enhanced piezoelectric response in nanoclay induced electrospun PVDF nanofibers for energy harvesting. **Energy**, v. 171, p. 485–492, 2019.

TOHLUEBAJI, N.; PUTSON, C.; MUENSIT, N. Enhanced electroactive β -phase formation and dielectric properties of piezoelectric electrospun nanofibers by ZnO nanoparticles. **Materials Today: Proceedings**, v. 17, p. 1637–1643, 2019.

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.

WANG, S. et al. Core-shell structured silk Fibroin/PVDF piezoelectric nanofibers for energy harvesting and self-powered sensing. **Nano Materials Science**, 2021.

WANG, X. et al. Tactile-sensing based on flexible PVDF nanofibers via electrospinning: A review. **Sensors (Switzerland)**, v. 18, n. 2, 2018.

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, 2021.

WU, H. et al. Review of application and innovation of geotextiles in geotechnical engineering. **Materials**, v. 13, n. 7, p. 1–21, 2020a.

WU, L. et al. The deformation behaviors and mechanism of weft knitted fabric based on micro-scale virtual fiber model. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 187, p. 105-929, 2020b.

WU, S. et al. Preparation and characterization of biodegradable trilayer films based on starch and polyester. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 183, p. 1058–1066, 2021.

WU, W. et al. Resonating characterization of piezoelectric fibers applicable to flexible self-powered fabric. **Procedia Engineering**, v. 120, n. 0, p. 1028–1031, 2015.

WYPYCH, G. **Handbook of Polymers**. Chemtec publishing, 2^a edição, 2016.

YADAV, P. et al. Piezoelectric characteristics of electrospun polyvinylidene fluoride/3rd generation hyperbranched polyester blend nanowebs. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

YAHYAPOUR, R. et al. Hybrid multilayered piezoelectric energy harvesters with non-piezoelectric layers. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, 2021.

YANG, T. et al. Recent advances in wearable tactile sensors: Materials, sensing mechanisms, and device performance. **Materials Science and Engineering R: Reports**, v. 115, p. 1–37, 2017.

YIN, Z. et al. Sweat-Driven Silk-yarn Switches Enabled by Highly Aligned Gaps for Air-conditioning Textiles. **Advanced Fiber Materials**, v. 1, n. 3–4, p. 197–204, 2019.

ZHANG, M. et al. Single BaTiO₃ nanowires-polymer fiber based nanogenerator. **Nano Energy**, v. 11, p. 510–517, 2015a.

ZHANG, M. et al. A hybrid fibers based wearable fabric piezoelectric nanogenerator for energy harvesting application. **Nano Energy**, v. 13, p. 298–305, 2015b.

ZHANG, Z.; CHEN, Y.; GUO, J. ZnO nanorods patterned-textile using a novel hydrothermal method for sandwich structured-piezoelectric nanogenerator for human energy harvesting. **Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures**, v. 105, p. 212–218, 2019.

ZHENG, N. et al. In-situ pull-off of ZnO nanowire from carbon fiber and improvement of interlaminar toughness of hierarchical ZnO nanowire/carbon fiber hybrid composite laminates. **Carbon**, v. 110, p. 69–78, 2016.

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

ZHU, R. et al. Poling-free energy harvesters based on robust self-poled ferroelectric fibers. **Nano Energy**, v. 50, p. 97–105, 2018.