



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

Gisele Cristina Bessa

**Caracterização de fibras óticas poliméricas introduzidas pela técnica de costura para o desenvolvimento de têxteis inteligentes**

Blumenau  
2022

Gisele Cristina Bessa

**Caracterização de fibras óticas poliméricas introduzidas pela técnica de costura para o desenvolvimento de têxteis inteligentes**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Têxtil.

Orientador: Prof.(a) Dra. Fernanda Steffens  
Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Mejia Rincon

Blumenau

2022

Bessa, Gisele Cristina

Caracterização de fibras óticas poliméricas introduzidas pela técnica de costura para o desenvolvimento de têxteis inteligentes / Gisele Cristina Bessa ; orientador, Fernanda Steffens, coorientador, Leonardo Mejia Rincon, 2022.

91 p.

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

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Têxteis inteligentes. 3. Fibra ótica polimérica (POF). 4. Costura de fibra ótica. 5. Resistência à abrasão, lavagem e secagem, transmissibilidade de luz. I. Steffens, Fernanda. II. Mejia Rincon, Leonardo . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil. IV. Título.

Gisele Cristina Bessa

**Caracterização de fibras óticas poliméricas introduzidas pela técnica de costura para o desenvolvimento de têxteis inteligentes**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 18 de novembro de 2022, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Camilla Borelli, Dra.  
Senai/SP

Prof.(a) Grazyella Cristina Oliveira de Aguiar, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Catia Rosana Lange de Aguiar, Dra.  
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 Mestra em Engenharia Têxtil

---

Prof.(a) Rita de Cássia Siqueira Curto Valle, Dra.  
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação

---

Prof.(a) Fernanda Steffens, Dra.  
Orientadora

Blumenau, 2022.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos  
pais, irmãos e a minha linda sobrinha.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina por me abrir novos horizontes através do curso de mestrado.

A Deus e a Jesus Cristo, pela vida, saúde e realização deste sonho. A eles: toda a honra, glória e louvor, amém.

Aos meus pais Adércio Alves Bessa e Maria Ivete Pereira Bessa, pelo exemplo de vida, amor incondicional e por acreditarem em mim.

Aos meus irmãos Raquel Bessa e Jeremias Alves Bessa, por compreenderem a minha ausência, pelo amor e por serem os meus maiores amigos e à minha linda sobrinha Maria Olivia Bessa, cuja chegada tornou a nossa vida mais completa.

À minha orientadora Dra. Fernanda Steffens, da UFSC, Campus de Blumenau, por ser uma inspiração de inteligência e excelência. E ao meu coorientador Dr. Leonardo Mejia Rincon da UFSC, Campus de Blumenau, por ser um exemplo de direcionamentos inteligentes e talento para ouvir.

À minha amiga Maura Inácio, pelos conselhos e por ser um dos maiores exemplos de devoção a Deus.

Às minhas amigas Tais Demathe e Luana Tiezerini pela amizade.

Às minhas amigas Gabriela Maestri, Michele Schmidt, Salete Koslowski e Julia Lazarin de Oliveira pelo apoio e parceria.

Ao Grupo Malwee e ao meu gestor Luiz Thiago Ribeiro de Freitas porque me deram oportunidade quando eu precisava concluir esta importante etapa da minha vida. E por me inspirarem a fazer o bem e a fazer bem feito.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência” (FORD, 1910).

## RESUMO

As fibras óticas (OF, do inglês *optical fibers*) são filamentos transparentes e cilíndricos podendo apresentar espessuras tão finas quanto as de um fio de cabelo humano. Elas possuem basicamente três partes: núcleo central, revestimento do núcleo e revestimento externo, sendo que estruturalmente são formadas a partir de materiais como vidro ou polímero. Uma das maiores aplicações das OFs ocorre no setor de comunicação onde são amplamente utilizadas na transmissão de dados a velocidades inimagináveis em décadas passadas. Nos têxteis as OFs estão presentes em diversos estudos, seja através de sistemas de sensores ou têxteis luminescentes. A presente dissertação consiste na caracterização de um tipo específico de fibra ótica (POF, do inglês *polymeric optical fiber*) onde se estudou a sua introdução através da técnica de costura visando o desenvolvimento de têxteis inteligentes. A máquina utilizada foi uma reta, o tipo de ponto que obteve melhor desempenho foi o tipo 301 e as costuras foram realizadas sobre uma estrutura *jersey* de algodão. Em relação ao método, o que apresentou melhor comportamento foi aquele no qual se introduziu a POF na bobina da máquina e na sequência foram realizadas costuras em formas de retângulos e circunferências além de retas. Após essa etapa, as amostras com costura foram caracterizadas. Os ensaios foram: lavagem e secagem, resistência à abrasão pelos métodos Martindale e Pilling box e ao foi avaliada a transmissibilidade de luz a partir de um laser emissor de luz e também a intensidade de luminância de cada costura a partir de um *software* desenvolvido especificamente para este trabalho. Observou-se que as amostras em forma de retas apresentaram pouca queda na intensidade de luminância. Já as amostras com costuras na forma de retângulo e circunferência apresentaram resultados de queda à medida que a distância da fonte emissora de luz aumentava. Após serem submetidas aos ensaios de caracterização supracitados, de modo geral as amostras apresentaram comportamento de queda na intensidade de luminância, ao passo que também pôde-se constatar a possibilidade de alcançar luminescência após a técnica de costura e inclusive após os ensaios diversos. A abordagem inédita da presente dissertação é a caracterização das POFs para o desenvolvimento de têxteis inteligentes, explorando a técnica de costura. Criando assim oportunidades ao setor de moda e vestuário no que tange roupas com *designs* luminescentes, agregando além do valor estético, também questões como segurança e sinalizações diversas.

**Palavras-chave:** Costura. Resistência à abrasão. Lavagem. Secagem.

## ABSTRACT

Optical fibers (OF) are transparent, cylindrical filaments that can be as thin as a human hair. They basically have three parts: central core, core-cladding, and outer cladding, and structurally they are formed from materials such as glass or polymer. One of the biggest applications of OFs occurs in the communication sector where they are widely used in data transmission at speeds unimaginable in past decades. In textiles, OFs are present in several studies, either through sensor systems or luminescent textiles. The present dissertation consists of the characterization of a specific type of optical fiber, the polymeric optical fiber (POF) where its introduction was studied through the sewing technique aiming at the development of smart textiles. The machine used was a straight one, the type of stitch that had the best performance was type 301 and the seams were made on a cotton jersey structure. Regarding the method, the one that presented the best behavior was the one in which the POF was introduced into the machine's bobbin, and, in the sequence, seams were made in rectangles and circumferences in addition to straight lines. After this step, the stitched samples were characterized. The tests were: washing and drying, abrasion resistance by the Martindale and Pilling box methods and at the end the light transmissibility the samples were evaluated from a light emitting laser and the luminance intensity of each seam using a software developed specifically for this purpose. job. It was observed that the samples in the form of straight lines showed little decrease in luminance intensity. The samples with seams in the form of rectangles and circumferences showed falling results as the distance from the light emitting source increased. After being subjected to the characterization tests mentioned above, in general the samples showed a decrease in luminance intensity, while it was also possible to verify the possibility of achieving luminescence after the sewing technique and even after the various tests. The novel approach of this dissertation is the characterization of POFs for the development of smart textiles, exploring the sewing technique. Thus creating opportunities for the fashion and clothing sector in terms of clothing with luminescent designs, adding, in addition to aesthetic value, also issues such as security and various signs.

**Keywords:** Sewing. Abrasion resistance. Washing. Drying.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura básica de uma OF.....	25
Figura 2 – Classificação das OFs: SM (a), e MM (b).....	27
Figura 3 – Funcionamento das OFs na transmissão de dados.....	27
Figura 4 – Formação dos danos mecânicos (têxteis luminescentes) .....	30
Figura 5 – Roupas inteligentes luminescentes com POFs: ternos da Shenzhen Fashion Luminous Clothing Co, Ltd. (a), toalha de mesa da LumiGram e Dreamlux (b), e bolsa com forro têxtil luminescente da Fabrinnk (c).....	31
Figura 6 – Comparação visual da eficiência de luminância de desenhos bordados com POF (a), e inserção de POF a partir da técnica de malharia por trama (retilínea) (b).....	34
Figura 7 – <i>Intra</i> looping (a), <i>Inter</i> looping (b), e <i>Interlacing</i> (c) .....	41
Figura 8 – Formação de ponto de costura (máquina reta) .....	43
Figura 9 – Formação do ponto de costura do tipo 301 (a) e aparência superior (b), formação do ponto de costura do tipo 304 (c) e aparência superior (d).....	43
Figura 10 – Ponto do tipo 304 (ziguezague) costurado sobre: OF de vidro SM (a), OF de vidro MM (b), e POF de PMMA (c).....	46
Figura 11 – OF de vidro SM na agulha (a), e sua ruptura (b) OF de vidro MM na agulha (c); POF na agulha (d), sua costura (e) e ruptura POF (f).....	47
Figura 12 – OF de vidro SM enrolada na bobina (a) e desenrolada (b); OF de vidro MM enrolada na bobina (c) e desenrolada (d); POF enrolada na bobina (e), e bobina encaixada na máquina (f) .....	48
Figura 13 – Ensaio de costurabilidade da POF no método 3 (a), e ensaio de transmissibilidade de luz (b) .....	49
Figura 14 – Materiais utilizados no ensaio de costurabilidade: POF (a), máquina reta (b), linha (c), agulha (d), malha <i>jersey</i> (e), cartolina (f), e tesoura, caneta e régua (g) .....	50
Figura 15 – Materiais utilizados no ensaio de lavagem e secagem: máquina de lavar (a) e secadora (b) .....	52

Figura 16 – Ensaio de Martindale: equipamento (a), preparação das amostras para sua fixação (b, c, d, e), tecido abrasivo (f), equipamento atuando (g), e programação de ciclos (h) .....	54
Figura 17 – Ensaio de Pilling box: equipamento (a), preparação das amostras (b), amostras antes do ensaio (c) e amostras após o ensaio (d, e) .....	56
Figura 18 – Laser emissor de luz.....	57
Figura 19 – Ensaio de transmissibilidade de luz: ambiente externo com iluminação (a) e ambiente externo ligeiramente escuro (b) .....	58
Figura 20 – <i>Software</i> avaliador de intensidade de luminância por densidade de cor em pixels.....	59
Figura 21 – Exemplo de utilização do <i>software</i> avaliador da intensidade de luminância por densidade de cor em pixels.....	60
Figura 22 – Exemplo de utilização do <i>software</i> para mensurar a costura em forma de reta.....	60
Figura 23 – Exemplo de utilização do <i>software</i> para mensurar 4 regiões da costura em forma de retângulo: aresta 1 (a), aresta 2 (b), aresta 3 (c), e aresta 4 (d) .....	61
Figura 24 – Exemplo de utilização do <i>software</i> para mensurar 4 regiões da costura em forma de circunferência: parte 1 (a), parte 2 (b), parte 3 (c), e parte 4 (d) .....	62
Figura 25 – Ensaio de costurabilidade nas formas: reta (a), retângulo (b) e circunferência (c).....	64
Figura 26 – Transmissibilidade de luz nas costuras em forma de: reta (a), retângulo (b), e circunferência (c).....	65
Figura 27 – Intensidade de luminância em pixels da amostra de reta A (a), reta B (b), reta C (c), e reta D (d) .....	66
Figura 28 – Análise da intensidade de luminância em pixels das retas.....	67
Figura 29 – Vértices (a, b, c, d), arestas (e, f, g, h) .....	67
Figura 30 – Intensidade de luminância em pixels da amostra de retângulo A: aresta 1 (a), aresta 2 (b), aresta 3 (c) e aresta 4 (d) .....	68
Figura 31 – Análise da intensidade de luminância em pixels das arestas de cada retângulo.....	68

Figura 32 – Intensidade de luminância em pixels da amostra de circunferência A: parte 1 (a), parte 2 (b), parte 3 (c), e parte 4 (d).....	70
Figura 33 – Análise da intensidade de luminância em pixels de cada parte das circunferências.....	70
Figura 34 – Transmissibilidade de luz na amostra de reta A: antes de lavar (a), 1 lavagem e secagem (b) e 2 lavagens e secagens (c).....	72
Figura 35 – Intensidade de luminância de cor em pixels da amostra de reta A: antes de lavar (a), 1 lavagem e secagem (b), e 2 lavagens e secagens (c).....	72
Figura 36 – Análise da intensidade de luminância em pixels das retas: antes e após o processo de lavagem e secagem.....	73
Figura 37 – Transmissibilidade de luz na amostra de retângulo A: antes de lavar (a), após 1 lavagem e secagem (b) e após 2 lavagens e secagens (c).....	74
Figura 38 – Intensidade de luminância de cor em pixels da amostra de retângulo A: aresta 1 antes de lavar (a), aresta 1 após 1 lavagem e secagem (b), aresta 1 após 2 lavagens e secagens (c).....	75
Figura 39 – Análise da intensidade de luminância em pixels de cada aresta do retângulo A: antes de lavar, após 1 lavagem e secagem, após 2 lavagens e secagens.....	75
Figura 40 – Amostras após o Martindale.....	76
Figura 41 – Transmissibilidade de luz antes e após o Martindale (125 ciclos) de cada grupo: A antes (a) e após (b); B antes (c) e após (d); C antes (e) e após o ensaio (f).....	77
Figura 42 – Intensidade de luminância em pixels antes e após o Martindale (125 ciclos) de cada grupo: A antes (a) e após (b); B antes (c) e após (d); C antes (e) e após (f) .....	78
Figura 43 – Análise da intensidade de luminância em pixels antes e após o Martindale.....	79
Figura 44 – Percentual de queda da intensidade de luminância antes e após o Martindale para seis ciclos distintos.....	79
Figura 45 – Intensidade de luminância em pixels das amostras do grupo A após o ensaio de Martindale, 2 lavagens e secagens: 125 ciclos (a), 500 ciclos (b), 1.000 ciclos (c); 2.000 ciclos (d), 5.000 (e), 7.000 ciclos (f).....	80

Figura 46 – Análise da intensidade de luminância em pixels: Martindale e Martindale + 2 lavagens e secagens (amostras do grupo A) .....	81
Figura 47 – Amostras após o ensaio de Pilling box.....	82
Figura 48 – Transmissibilidade de luz na da costura em forma de reta: na direção da coluna antes (a) e após o ensaio de Pilling box (b); na direção do curso antes (c) e após o ensaio (d).....	83
Figura 49 – Intensidade de luminância em pixels da costura em forma de reta: na direção da coluna antes (a) e após o ensaio de Pilling box (b); na direção do curso antes (c) e após (d).....	83
Figura 50 – Análise da intensidade de luminância em pixels das amostras antes e após o Pilling box.....	84

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Levantamento de artigos sobre têxteis inteligentes a partir de OFs.....	36
Quadro 2 – Determinação da quantidade de ciclos para as amostras de cada grupo.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento de publicações de artigos científicos (têxteis e OFs) de 2018 a 2022.....	23
Tabela 2 – Classes de pontos de costura.....	41
Tabela 3 – Percentual de queda na intensidade de luminância dos retângulos.....	69
Tabela 4 – Percentual de queda na intensidade de luminância das circunferências.....	71
Tabela 5 – Percentual de queda da intensidade de luminância após 1 e 2 lavagens e secagens.....	73
Tabela 6 – Percentual de queda da intensidade de luminância após ensaio de Martindale + 2 lavagens e secagens (grupo A).....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CO	Algodão – <i>Cotton</i>
LED	Diodos Emissores de Luz – <i>Light Emitting Diodes</i>
MM	Multimodo – <i>Multimode</i>
OF	Fibra Ótica – <i>Optical Fiber</i>
PES	Poliéster – <i>Polyester</i>
PMMA	Polimetilmetacrilato – <i>Polymethylmethacrylate</i>
POF	Fibra Ótica Polimérica – <i>Polymeric Optical Fiber</i>
PVA	Álcool Polivinílico
SHM	Monitoramento de Integridade Estrutural – <i>Structural Health Monitoring</i>
SM	Mono Modo – <i>Single Mode</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS.....	21
1.1.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>21</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>21</b>
2.1	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	22
2.2	EVOLUÇÃO DAS OFS AO LONGO DA HISTÓRIA.....	24
2.2.1	<b>Conceitos gerais sobre OFs.....</b>	<b>25</b>
2.2.2	<b>Materiais, propriedades e aplicações das OFs.....</b>	<b>25</b>
2.2.3	<b>Classificação das OFs.....</b>	<b>26</b>
2.3	TÊXTEIS INTELIGENTES.....	27
2.3.1	<b>Têxteis inteligentes luminescentes.....</b>	<b>29</b>
2.3.2	<b>OFS inseridas a partir de técnicas têxteis.....</b>	<b>31</b>
2.4	TÉCNICA DE COSTURA.....	39
2.4.1	<b>Pontos de costura.....</b>	<b>40</b>
2.4.2	<b>Classe de ponto 300.....</b>	<b>42</b>
2.4.3	<b>Formação de ponto de costura da máquina reta.....</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>44</b>
3.1	ENSAIOS PRÉVIOS.....	45
3.1.1	<b>Ensaio prévio de costurabilidade (método 1).....</b>	<b>45</b>
3.1.2	<b>Ensaio prévio de costurabilidade (método 2) .....</b>	<b>46</b>
3.1.3	<b>Ensaio prévio de costurabilidade (método 3) .....</b>	<b>48</b>
3.1.4	<b>Ensaio prévio de transmissibilidade de luz.....</b>	<b>49</b>
3.2	ENSAIO DE COSTURABILIDADE.....	50
3.3	ENSAIO DE LAVAGEM E SECAGEM.....	52
3.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO (MARTINDALE).....	53
3.5	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO (PILLING BOX) .....	55
3.6	ENSAIO DE TRANSMISSIBILIDADE DE LUZ.....	57

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>63</b>
4.1	ENSAIOS DE COSTURABILIDADE.....	63
<b>4.1.1</b>	<b>Ensaio de transmissibilidade de luz.....</b>	<b>64</b>
4.1.1.1	<i>Avaliação da intensidade de luminância nas costuras em forma de reta.....</i>	65
4.1.1.2	<i>Avaliação da intensidade de luminância nas costuras em forma de retângulos.....</i>	67
4.1.1.3	<i>Avaliação da intensidade de luminância nas costuras em forma de circunferência.....</i>	69
4.2	LAVAGEM E SECAGEM .....	71
<b>4.2.1</b>	<b>Avaliação da intensidade de luminância após lavagem e secagem nas costuras em forma de reta.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Avaliação da intensidade de luminância após lavagem e secagem nas costuras em forma de retângulo.....</b>	<b>74</b>
4.3	RESISTÊNCIA À ABRASÃO (MARTINDALE).....	76
<b>4.3.1</b>	<b>Transmissibilidade de luz após Martindale, lavagens e secagens.....</b>	<b>79</b>
4.4	RESISTÊNCIA À ABRASÃO (PILLING BOX).....	82
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>88</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da convergência entre áreas como física, elétrica e eletrônica, as fibras óticas (OFs) revolucionaram a indústria de telecomunicações, se caracterizando como a “espinha dorsal” da internet, uma vez que viabilizaram melhores desempenhos, com um maior alcance e velocidade na transmissão de dados digitais, estabilidade e segurança de dados. A internet, sinais de TV a cabo e telefonia por OF não usam eletricidade na transmissão de dados (como é o caso dos fios de cobre). Os dados digitais são transformados em luz que é emitida através de dispositivos eletrônicos semicondutores como laser ou LEDs (*Light Emitting Diodes*). Ao percorrer o cabo de OF de uma extremidade a outra, essa luz é transmitida (ocorrendo o fenômeno físico de reflexão total da luz) sendo transformada ao final em corrente elétrica por meio dos receptores luminosos (BARRIAS; CASAS; VILLALBA, 2016; MEYER, 2020; PEREIRA, 2021). Porém, não foi somente o setor de telecomunicações que passou a usufruir dos benefícios das OFs. Outras áreas, como medicina, aeroespacial, engenharia civil, microeletrônica, informática e a área têxtil são algumas das que também foram favorecidas (DECUSATIS, 2013; BARRIAS; CASAS; VILLALBA, 2016; HAROGLU; POWELL; SEYAM, 2017; MEYER, 2020).

As OFs são produzidas a partir de dois tipos de materiais: vidro ou polímero. São filamentos cilíndricos e transparentes, cuja funcionalidade é transportar luz ao longo da extensão de seu comprimento (KOIKE, 2015; NAJAFI *et al.* 2017; MERATI, 2018; TOSI *et al.* 2018). Dentre as principais vantagens e propriedades das OFs, se destacam: a transmissão de sinais com menos perdas; capacidade para transmitir grande quantidade de dados e por maiores distâncias; proteção contra interferências eletromagnéticas; e capacidade de suportar grandes pressões e elevadas temperaturas. Além disso, possui tamanho reduzido, reduzida massa, elevada flexibilidade e sensibilidade, estabilidade química, além de não gerar calor e não ser passível a descargas elétricas, o que proporciona um maior nível de segurança (KOIKE, 2015; ZHAO *et al.* 2016; NAJAFI *et al.* 2017; KOYAMA; NISHIYAMA; WATANABE, 2018; HUI, 2019; LEAL-JUNIOR *et al.* 2019).

As POFs são compostas de PMMA que é um polímero sintético (do inglês *Polymethylmethacrylate*) conhecido popularmente como “acrílico”. As POFs possuem

como principais propriedades: transparência, leveza, resistência à ruptura, elevado módulo de elasticidade, boa resistência a produtos químicos, boa resistência à altas temperaturas e biocompatibilidade (YANG; CHO, LEE, 2018; GE, 2021).

Conforme Haroglu, Powell, Seyam (2017) a aplicação de OFs em materiais têxteis vem ocorrendo desde a década de 90, quando surgiu a primeira camiseta utilizando OF, a “*Georgia Tech Wearable Motherboard*”, cujo objetivo era monitorar a saúde dos soldados. Em 2007, foram desenvolvidos sensores de OFs em combinação com materiais têxteis a fim de monitorar o movimento respiratório do abdômen de uma pessoa anestesiada. Na década de 60 a DuPont lançou um tecido luminescente a partir da utilização da POF. No ano de 2011 foram desenvolvidas estruturas têxteis integradas à sensores de fibras óticas poliméricas a fim de detectar e monitorar rachaduras e deformações em estruturas de alvenaria (SCHWARZ-PFEIFFER *et al.* 2016; MERATI, 2018; GE, 2021). Através da técnica de bordado Yang, Cho e Lee (2018) estudaram POFs inseridas a partir de vários desenhos com formas e ângulos distintos a fim de mensurar quais destes apresentariam maior resultado em termos de luminância. De acordo com os estudos de Chen *et al.* (2020) foi possível a introdução de POF através de um tear retilíneo, usando laçadas flutuantes.

Notam-se que os estudos existentes que relacionam substratos têxteis e OFs, têm como principal aplicação sensores para o monitoramento na área da saúde e construção civil. Já os estudos que utilizam POFs normalmente são direcionados para o desenvolvimento de têxteis inteligentes luminescentes, com funcionalidades de agregar valor estético, segurança e sinalizações diversas. Os substratos têxteis apresentam vantagens por serem estruturalmente finos, leves, flexíveis e com múltiplas possibilidades de serem combinados com outros materiais, podendo assim ser aplicados em diversos produtos. Portanto, a combinação entre têxteis e POFs torna-se atrativa no campo dos têxteis inteligentes uma vez que este tipo de material possui leveza, flexibilidade, maciez e custos baixos (SCHWARZ-PFEIFFER *et al.* 2016; MERATI, 2018; YANG; CHO, LEE, 2018; GE, 2021).

Entretanto, não foram encontrados estudos sobre caracterização de POFs e posterior avaliação de transmissibilidade de luz e intensidade de luminância para comparar o antes e após os ensaios de caracterização, simulando sua utilização pelo

consumidor final. Portanto, o presente trabalho tem como principal objetivo de preencher tais lacunas.

## 1.1 OBJETIVOS

Nas seções a seguir estão descritos: objetivo geral e objetivos específicos da presente dissertação de mestrado.

### 1.1.1 Objetivo geral

Caracterizar POFs inseridas mecanicamente a partir da técnica de costura, para o desenvolvimento de têxteis inteligentes.

### 1.1.2 Objetivos específicos

A seguir, são apresentados os objetivos específicos visando responder ao objetivo geral:

- a) definir os tipos de pontos de costuras mais eficientes para aplicar POFs em substratos têxteis utilizando a máquina de costura reta;
- b) avaliar a transmissibilidade de luz da POF após a realização da costura no substrato têxtil;
- c) analisar a transmissibilidade de luz da POF costurada no substrato têxtil após o ensaio de lavagem e secagem;
- d) aferir a transmissibilidade de luz da POF costurada no substrato têxtil após ensaios de resistência à abrasão pelos métodos Martindale e Pilling box.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura foi estruturada em quatro tópicos, a saber: o primeiro apresenta a análise bibliométrica referente às publicações de artigos científicos que possuem relação com o tema do presente trabalho. O segundo tópico trata de conceitos gerais relacionados com a história, materiais, propriedades e aplicações das

OFs. A terceira seção contempla os têxteis inteligentes a partir de OFs, apresentando um resumo dos principais artigos encontrados e as motivações para a escolha do tema desta dissertação. E a quarta seção encerra contextualizando a técnica da costura.

## 2.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Realizou-se uma pesquisa na base de dados do Google Acadêmico para verificar os estudos que relacionavam materiais têxteis e OFs. Os critérios de busca seguiram a ordem sequencial da plataforma: definição de palavras-chave escritas na língua inglesa utilizando o operador booleano and; busca por artigos em todos os idiomas; exclusão de patentes e citações; período de busca entre 2018 a setembro de 2022. A Tabela 1 apresenta os dados obtidos.

Tabela 1 – Levantamento de publicações de artigos científicos (têxteis e OFs) de 2018 a 2022

<b>Palavras-chave</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>Total</b>
<i>“Optical fiber”</i>	192.000	168.000	123.000	107.000	97.400	<b>687.400</b>
<i>Textile</i>	122.000	123.000	111.000	62.100	60.600	<b>478.700</b>
<i>Clothing</i>	105.000	92.200	82.300	64.100	46.600	<b>390.200</b>
<i>Textile and “optical fiber”</i>	11.100	12.800	14.500	14.500	14.200	<b>67.100</b>
<i>Fabric and “optical fiber”</i>	10.600	12.200	12.900	15.300	11.300	<b>62.300</b>
<i>Wearables and “optical fiber”</i>	5.530	6.940	8.650	11.200	8.000	<b>40.320</b>
<i>Clothing and “optical fiber”</i>	6.730	7.850	8.330	10.100	7.290	<b>40.300</b>
<i>“Smart textile” and “optical fiber”</i>	3.480	4.180	4.950	6.440	5.500	<b>24.550</b>
<i>Sewing and textile and “optical fiber”</i>	674	656	753	783	678	<b>3.544</b>
<i>“Smart clothes” and “optical fiber”</i>	1.820	2.140	2.180	2.700	2.280	<b>2.280</b>
<i>Sewing and wearable and “optical fiber”</i>	328	373	473	510	435	<b>2.199</b>

Fonte: elaborado pelo autor

Ao analisar a Tabela 1, é possível observar que partindo de termos genéricos para aqueles mais específicos, a quantidade de publicações tende a reduzir devido ao filtro. Além disso, também é possível notar um crescimento gradativo, ano após ano, em relação às palavras-chave que possuem ligação com os termos “costura”, “têxtil” e “fibras óticas”. Isso denota maior interesse sobre o tema e um progresso ano a ano. Ressalta-se que a pesquisa ocorreu até meados de setembro de 2022, o que justifica o reduzido número para este ano.

## 2.2 EVOLUÇÃO DAS OFS AO LONGO DA HISTÓRIA

A década de 60 do século passado marcou o setor das telecomunicações com grande evolução por meio do início da comunicação ótica e do surgimento do laser. Nesse período, observou-se que, em relação a comunicação, quando comparada aos cabos metálicos, as OFs tinham condições de produzir uma maior capacidade de transmissão de dados, de conexão e de largura de banda. Em 1966, Kao e Hockman propuseram a utilização das OFs em telecomunicações para médias distâncias (KOIKE, 2015).

A primeira menção no que se refere a sigla “OF” do inglês *optical fiber*, foi na aplicação de sensores que aconteceu na metade do século XX, com referência a endoscópios flexíveis, que revolucionaram a área de medicina. Este tipo de detectores com base em OF recebeu notoriedade frente aos modelos convencionais, produzidos a partir de sensores elétricos, devido às suas vantagens referentes à qualidade e redução de custo (KOIKE, 2015; BARRIAS; CASAS; VILLALBA, 2016). A seguir, na década de 80, já haviam pesquisas e desenvolvimentos de sensores de OFs com os seguintes tipos de aplicações: magnético, acústico, pressão, temperatura, aceleração, giroscópio, deslocamento, nível de fluido, torque, fotoacústica, corrente e deformação (BARRIAS; CASAS; VILLALBA, 2016).

Em 2009, Charles Kao realizou uma notável contribuição quando desenvolveu uma OF de baixa perda. Essa descoberta repercutiu em sistemas de comunicação ótica com tamanha praticidade que desde então passaram a ser utilizados no mundo inteiro. Esse trabalho rendeu ao pesquisador chinês o prêmio Nobel de física, sendo ele também o responsável por sugerir a utilização de tal tecnologia na transmissão de

chamadas telefônicas. Seus trabalhos contribuíram para provar que cabos de OFs tinham excelentes capacidades de transmissão de dados considerando os modelos convencionais da época, incluindo navegação na internet, geração de e-mails, telemedicina e educação remota, tudo isso com um nível de qualidade até então desconhecido naquela época e a custos reduzidos (KOIKE, 2015; MEYER, 2020).

Diante de tais relatos históricos, fica evidente a enorme contribuição que o setor de comunicações teve no processo evolutivo das OFs bem como a própria revolução sofrida neste setor ao longo dos anos (BARRIAS; CASAS; VILLALBA, 2016).

### 2.2.1 Conceitos gerais sobre OFs

As OFs podem ser definidas como estruturas de formato cilíndrico, transparentes, flexíveis, semelhantes a finos filamentos. São desenvolvidas a partir de vidro ou polímero e o principal objetivo é transportar luz que pode ser introduzida por meio de emissores de luz (fonte luminosa) ao longo da extensão de seu comprimento até um fotodetector (receptor luminoso). A estrutura de uma OF é constituída de núcleo central, revestimento do núcleo e revestimento externo, conforme pode ser visto na Figura 1 (KOIKE, 2015; NAJAFI *et al.* 2017; MERATI, 2018; TOSI *et al.* 2018; HUI, 2019; PEREIRA, 2021;).

Figura 1 – Estrutura básica de uma OF



Fonte: elaborado pelo autor

### 2.2.2 Materiais, propriedades e aplicações das OFs

As OFs de vidro são compostas por sílica fundida (óxido de silício –  $\text{SiO}_2$ ) de elevada pureza sendo que o núcleo apresenta germânio ou fósforo para aumentar o

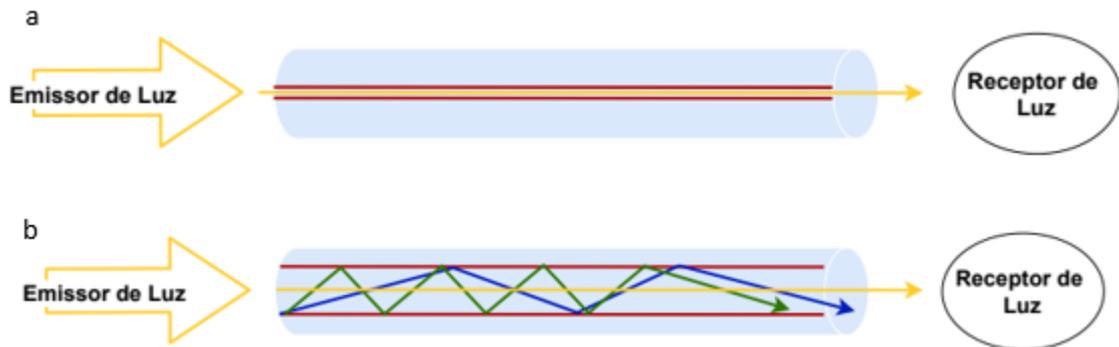
índice de refração. Suas principais propriedades são: robustez, resistência à radiação, resistência à elevadas temperaturas e a ambientes corrosivos. Este tipo de OF é utilizado em sistemas de comunicação de longa distância, como por exemplo, em redes submarinas. Também possui aplicações em sensores para a área de telecomunicações devido à praticidade, produção em massa, qualidade e por ser um excelente candidato para monitoria de alteração de temperatura e deformação (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007; KOIKE, 2015; BREMER *et al.* 2017; TOSI *et al.* 2018; TOW *et al.* 2018).

As POFs, na sua maioria, conforme mencionado anteriormente, são compostas de polimetilmetacrilato (PMMA) e dentre as principais propriedades, se destacam: facilidade de manuseio, transparência, leveza, resistência a ruptura, elevado módulo de elasticidade, boa resistência à produtos químicos, boa resistência à altas temperaturas e biocompatibilidade (YANG; CHO, LEE, 2018; GE, 2021). A comunicação de curto alcance tem estimulado a pesquisa, o desenvolvimento e a comercialização das POFs para aplicações em instrumentação médica, automóveis, aeronaves e eletrônicos de consumo. Excelente candidata para sensores de detecção de elevada deformação, aceleração e bio-sensoriamento. Por serem leves e flexíveis, as POFs se tornam candidatas atrativas para aplicações têxteis (DECUSATIS, 2013; WOYESSA *et al.* 2016; MERATI, 2018; LEAL-JUNIOR *et al.* 2019; Lou; Yu, 2019).

### 2.2.3 Classificação das OFs

As OFs são classificadas em monomodo (SM, do inglês *Single Mode*) e multimodo (MM, do inglês *Multi Mode*). O tipo SM possui um núcleo de diâmetro reduzido, admitindo, portanto, um único modo (caminho) para a propagação da luz (THYAGARAJAN; GHATAK, 2007; KOIKE, 2015; TOSI *et al.* 2018; OLIVEIRA, 2021; PEREIRA, 2021). O tipo MM possui um núcleo com diâmetro maior, permitindo mais que um modo, ou seja, vários modos (caminhos) para a propagação da luz (KOIKE, 2015; TOSI *et al.* 2018; OLIVEIRA, 2021; PEREIRA, 2021). A Figura 2 ilustra o esquema de uma OF do tipo SM e MM.

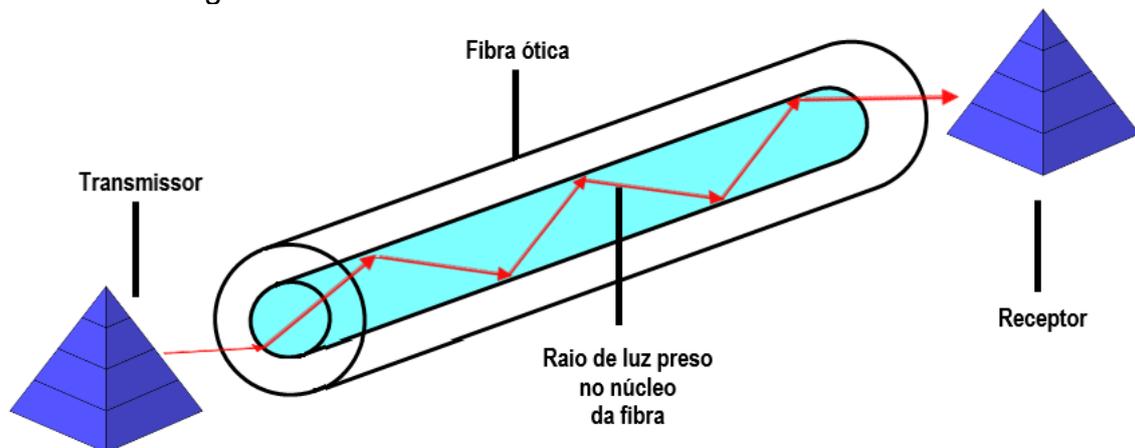
Figura 2 – Classificação das OFs: SM (a), e MM (b)



Fonte: adaptado de Koike (2015)

A Figura 3 ilustra o esquema do funcionamento básico das OFs na transmissão de dados:

Figura 3 – Funcionamento das OFs na transmissão de dados



Fonte: elaborado pelo autor

### 2.3 TÊXTEIS INTELIGENTES

Segundo Gong *et al.* (2019), os têxteis tiveram por muito tempo a função primordial de proteger os indivíduos contra as intempéries. Entretanto, novas demandas foram surgindo, principalmente relacionadas a estética e a moda.

De acordo com Ferreira, Nunes Ferreira e Oliveira (2014), o termo “têxteis inteligentes” do inglês *smart textiles*, é derivado do conceito de “materiais inteligentes”

e foi empregado pela primeira vez em 1989, no Japão. Entre as décadas de 60 e 70 surgiram os materiais com memórias de forma e géis poliméricos. Entretanto, os materiais inteligentes foram introduzidos no setor têxtil mais tarde, na década de 90, sendo que o primeiro têxtil inteligente foi um fio de seda com memória de forma. Como ampla definição, pode-se afirmar que os têxteis inteligentes são substratos fibrosos que sentem e reagem a diferentes estímulos que podem ser, por exemplo, mecânico, químico, elétrico, térmico, magnético. Eles podem ser classificados como passivos, ativos e muito inteligentes. Os tipos passivos são aqueles que possuem um baixo nível de complexidade; eles sentem estímulos ou condições ambientais e normalmente funcionam como sensores. Os tipos ativos são aqueles que sentem os estímulos ou condições ambientais. Além disso, promovem reação aos estímulos. Os muito inteligentes são os mais complexos, eles podem sentir os estímulos, reagir e se adaptar em relação a resposta recebida.

Segundo Mahmoud (2004) os têxteis inteligentes baseados em fibras óticas podem ser aplicados em uniformes para as mais diversas áreas de aplicação, que por sua vez podem detectar condições ambientais. Esta capacidade de detecção é possibilitada a partir da modificação das fibras óticas passivas com a finalidade de passarem a possuir sensibilidade química, tornando-se ativas. Esta modificação pode ser obtida a partir de uma pequena seção da fibra ótica, onde o material de revestimento passivo é substituído por um agente quimicamente sensível. Uma vez que este material é incorporado no vestuário, como uniformes para soldados, bombeiros, segurança, entre outros, estes poderão fornecer avisos imediatos sobre a presença de produtos químicos ou toxinas no ambiente.

Os têxteis inteligentes também podem ser formados a partir de OFs, que por sua vez vêm despertando interesse devido às suas propriedades. O desenvolvimento de têxteis inteligentes a partir de OFs vem ocorrendo de duas maneiras: inserção de OF para o desenvolvimento de têxteis luminescentes e sensor de OF vestível para monitoramento (GONG *et al.* 2019).

De acordo com Merati (2018), atualmente, diversas são as aplicações de OFs a partir de tecnologia têxtil para o desenvolvimento de produtos inteligentes, como em *display*, dispositivos de comunicação e sensores na área da saúde. Os substratos têxteis se tornam atrativos para aplicações com OFs devido a propriedades como

leveza, flexibilidade e possibilidade de desenvolvimento de diferentes *designs*. No caso específico da POF, dadas as propriedades de durabilidade, biocompatibilidade, robustez, leveza, flexibilidade, fácil manuseio, capacidade de transmissão e conexões simples, também criam possibilidades de combinações com substratos têxteis.

De acordo com Koyama, Nishiyama e Watanabe (2018), os têxteis podem contribuir grandemente no campo de sensores vestíveis, devido à sua capacidade de proporcionar conforto (KOYAMA; NISHIYAMA; WATANABE, 2018; MERATI, 2018).

Para Schwarz-Pfeiffer *et al.* (2016), uma vez que a sociedade vem sendo cada vez mais impactada pela evolução da ciência e da tecnologia, que por consequência estão presentes em produtos e serviços, logo aumentam as demandas por desenvolvimento de materiais inteligentes.

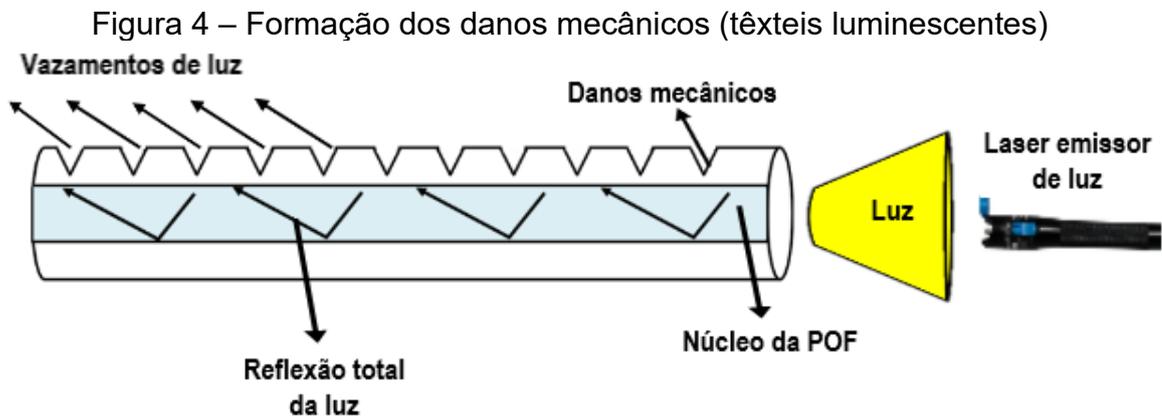
### **2.3.1 Têxteis inteligentes luminescentes**

Os têxteis luminescentes fazem parte de uma das categorias dos têxteis inteligentes (Ferreira, Nunes Ferreira e Oliveira (2014). Tais materiais podem ser definidos como aqueles que possuem capacidade de produzir ou emitir luz a partir de estímulos. Segue classificação de acordo com diferentes tipos de estímulos: otoluminescentes (que conduzem luz); eletroluminescentes (estimulados pela eletricidade); quimiluminescentes (estimulados por reação química); triboluminescentes (que têm reação mecânica como estímulo); fotoluminescentes (estimulados pela luz); radioluminescência (que têm radiação iônica como estímulo).

Para Merati (2018), a combinação entre têxteis e POFs tem a possibilidade de gerar iluminação com maior nível de segurança, devido à ausência de geração de calor no ponto de iluminação. Além disso, também é possível produzir radiação e transmissão de sinal. Segundo Gong *et al.* (2019), o desenvolvimento de POFs inseridas aos têxteis com objetivo de têxteis luminescentes vem sendo impulsionado pelo público mais jovem de consumidores, pois valorizam a moda e a exclusividade que o vestuário pode proporcionar. As POFs conectadas aos têxteis, podem emitir iluminação por meio de uma fonte de luz externa.

Uma roupa fotônica inteligente luminescente pode ser definida como um vestuário que transporta luz ao logo do orifício oco de uma POF. A emissão de luz de

materiais têxteis a partir da introdução de POF pode ser obtida através dos danos mecânicos do seu revestimento, onde ocorre o que se chama de “vazamento de luz”. Quando não ocorre a curvatura, a luz viaja dentro do núcleo da POF com reflexão interna total o que permite a luz partir de uma extremidade a outra sem vazamentos. Os danos mecânicos (pequenas rachaduras) sobre o material (Figura 4), podem ser obtidos através do processo de “gravação” (ou mesmo durante o processo têxtil) que servirá para impor várias perfurações ao longo da superfície da POF, por onde ocorrerão os vazamentos de luz (YANG; CHO, LEE, 2018; GE, 2021). A combinação de equipamentos como LED, conector, placa de circuito, bateria e um tecido que contenha POF, pode fornecer uma função de luminescência.



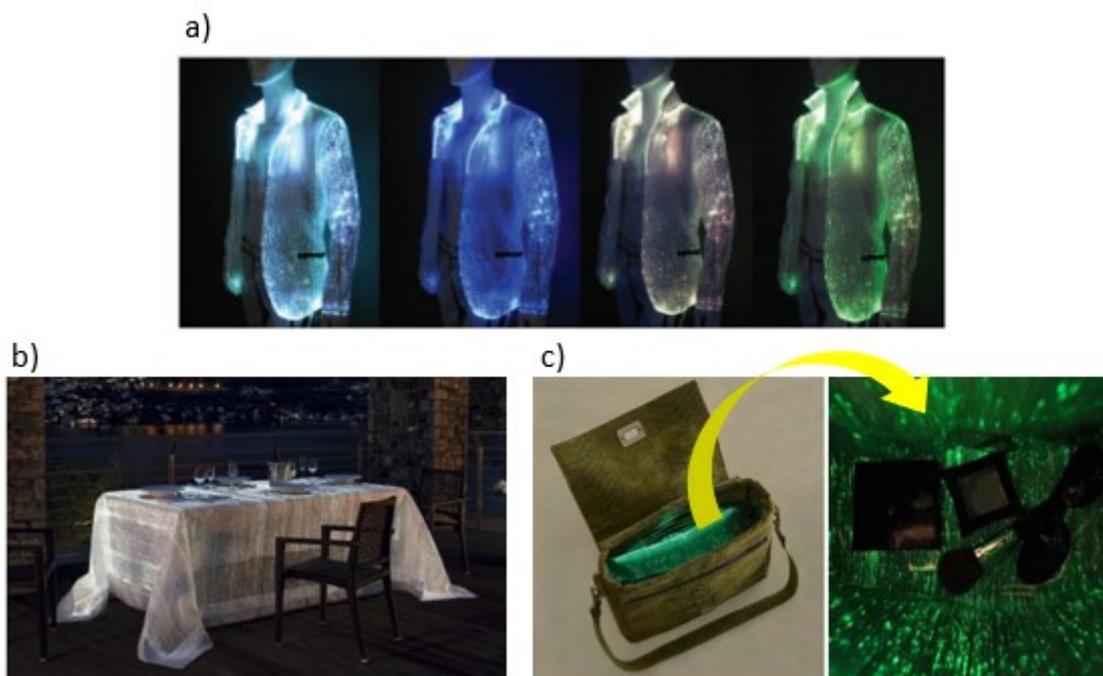
Fonte: elaborado pelo autor

Na Coreia, a *Third Eye, Ltd*, desenvolveu um tecido luminescente a partir de fibras óticas flexíveis para assentos automotivos. Tal tecnologia teve como principal função promover maior segurança através de uma iluminação inteligente, preparada para responder a determinadas situações, como o excesso de velocidade, ao não uso do cinto de segurança e à porta aberta, por exemplo. Em 2016, na China, a *Shenzhen Fashion Luminous Clothing Co, Ltd*, começou aplicar fibras óticas flexíveis para desenvolver, produzir e comercializar diversos produtos, tais como: vestidos luminosos, ternos (Figura 5a), casacos, jaquetas, saias e calças; acessórios, como bolsas, lenços, xales e gravatas; e tecidos para usos domésticos, como cortinas, toalhas de mesa (Figura 5b) e capas de cadeiras (YANG; CHO, LEE, 2018).

De acordo com Ge (2021) empresas como LumiGram e Dreamlux também desenvolveram têxteis inteligentes luminescentes para distintas aplicações, dentre

elas moda e decoração de interiores (Figura 5b). Já a marca de moda Fabrinkk do Reino Unido projetou uma bolsa cujo forro interno é um tecido de fibra ótica, com a funcionalidade de auxiliar os clientes a procurarem seus pertences com facilidade, especialmente durante a noite (Figura 5c).

Figura 5 – Roupas inteligentes luminescentes com POFs: ternos da Shenzhen Fashion Luminous Clothing Co, Ltd. (a), toalha de mesa da LumiGram e Dreamlux (b), e bolsa (forro com têxtil luminescente na parte interna) da Fabrinkk (c)



Fonte: Yang; Cho, Lee (2018); Ge (2021)

### 2.3.2 OFs inseridas a partir de técnicas têxteis

A seguir serão apresentados alguns estudos verificados na literatura sobre a utilização de fibras óticas aplicadas em substratos fibrosos a partir de tecnologias têxteis.

No estudo de Oscarsson *et al.* (2009) foi desenvolvido um abajur a partir de um tear de malharia por trama (retilínea), galga 12, utilizando monofilamento de Poliéster (PES) e POFs de 0,25 e 0,75 mm de diâmetro com a finalidade de iluminação. Para a inserção da POF durante a formação da carreira de malha foi utilizado um dispositivo específico de alimentação com o objetivo de gerar o mínimo de tensão possível.

Com a finalidade de realizar um procedimento de terapia fotodinâmica destinado ao tratamento de lesões dermatológicas, o estudo de Oguz *et al.* (2016) tratou do desenvolvimento de um tecido emissor de luz a partir da inserção de POF em diferentes raportes. O objetivo era desenvolver um tratamento de lesões com emissão de luz uniforme e intensa, contando com um sistema flexível devido a anatomia do corpo humano. Os fios utilizados, tanto na direção do urdume como na direção da trama foram 100 % PES com título 330 dtex e POFs 250  $\mu\text{m}$  e dois diodos a laser foram utilizados para gerar iluminação no tecido. De acordo com os autores, os objetivos foram alcançados.

O estudo de Najafi *et al.* (2017) consiste na validação de meias inteligentes a partir de sensores de OFs, com o objetivo de gerenciar simultaneamente parâmetros como a temperatura plantar, a pressão e rigidez dos dedos, para evitar a amputação de pés de pacientes diabéticos. A partir da inserção de um sensor de OF em uma meia o estudo conclui que se torna promissora tal junção, uma vez que os testes apresentaram o gerenciamento de parâmetros fisiológicos associados à leveza e ao conforto do material.

O grupo de investigação composto por Bremer *et al.* (2017) avaliou dois métodos diferentes para desenvolver sensores de monitoramento do tipo *Structural Health Monitoring* (SHM). O primeiro método utilizou sensor de OF de vidro MM e multifilamentos de polipropileno, ambos inseridos por meio de um tear de malharia por urdume. Ao final, a estrutura têxtil (semelhante a uma rede) recebeu um revestimento de copolímero visando a sua estabilidade. O segundo método utilizou sensor de OF revestida com fibras de carbono inserido pela técnica de bordado, sobre a base de não tecido de álcool polivinílico (PVA). De acordo com os autores, ambos os métodos de inserção de sensores de OFs apresentaram resultados promissores.

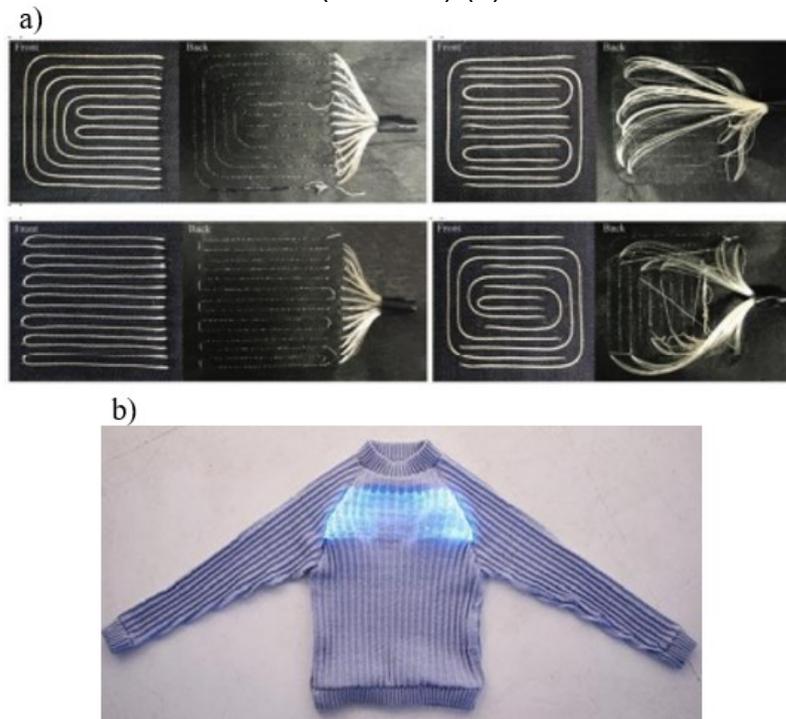
Na pesquisa de Koyama, Nishiyama e Watanabe (2018) a inserção de OF foi realizada por intermédio de um tear de tecido plano, onde a OF MM com dimensões 9/125  $\mu\text{m}$  e 5/125  $\mu\text{m}$  (a primeira numeração refere-se a medida do diâmetro e a segunda do diâmetro do revestimento) foi recoberta por um fio de lã e em seguida inserida na direção da trama. Posteriormente, o tecido, já contendo o sensor em sua estrutura, foi costurado na altura do peito de uma peça de vestuário, com objetivo de monitorar os batimentos cardíacos e a respiração de qualquer indivíduo.

As pesquisas de Yang, Cho e Lee (2018) consideraram a inserção de POFs por meio da tecnologia de bordado sobre um tecido, com intuito de obter um *display* sobre o substrato têxtil. Os autores testaram POFs flexíveis e não flexíveis, com 1,5 mm de diâmetro, a partir de diferentes desenhos de bordado (Figura 6a). Fizeram comparações entre as fibras medindo a influência dos ângulos dos desenhos formados pela luminância. Uma das constatações da pesquisa foi de que independente do tipo de desenho de bordado, a POF flexível apresentou valores de luminância superiores que a POF não flexível. Outra medição realizada foi referente aos valores de luminância conforme a distância da fonte de luz: o aumento desta distância resulta na redução da luminância. De acordo com os autores, a pesquisa trouxe contribuições para o campo das roupas fotônicas inteligentes luminescentes.

A investigação de Leal-Junior *et al.* (2019) refere-se à junção de um têxtil e POF, com objetivo de mensurar simultaneamente parâmetros como frequência cardíaca e respiratória. O têxtil utilizado no estudo foi um substrato com propriedades elásticas e o sensor de POF foi aplicado junto ao mesmo. Posteriormente, ambos foram inseridos junto ao peito do usuário, para realização dos testes de monitoramento, durante as atividades diárias de rotina. De acordo com os autores, a proposta de monitoramento por meio de uma solução de baixo custo foi alcançada.

A investigação de Chen *et al.* (2020) consistiu no desenvolvimento de uma malha a partir de um tear retilíneo manual (Figura 6b), utilizando POF com 0,25 mm de diâmetro e fio de acrílico. O estudo abordou uma nova técnica de inserção da POF, a fim de reduzir os danos críticos causados pelo processo de tricotagem, que por sua vez geram implicações na passagem de luz ao longo do comprimento da fibra. O objetivo final, que era criar uma estrutura de malha que combinasse laçadas tece e flutuantes para uma peça do vestuário, foi alcançado.

Figura 6 – Comparação visual da eficiência de luminância de desenhos bordados com POF (a), e inserção de POF a partir da técnica de malharia por trama (retilínea) (b)



Fonte: Yang; Cho, Lee (2018); Chen *et al.* (2020)

Eom, Lee e Kim (2016) estudaram sobre sensores vestíveis à base de materiais têxteis, utilizando uma máquina de costura, enrolando um fio constituído de nanofilamento de metal com fibras condutoras em torno do eixo da bobina da máquina e posteriormente costurando um uma reta de aproximadamente 3 cm sobre um elástico. O objetivo era testar sensores de tensão e pressão. O sensor de tensão demonstrou elevada sensibilidade e o sensor de pressão apresentou resultados razoáveis.

Em seu trabalho, Harnett, Zhao e Shepherd (2017) tiveram como objetivo desenvolver têxteis sensíveis à deformação a partir de uma OF revestida de poliuretano e silicone, com 1,0 mm a 2,0 mm de diâmetro, comercialmente conhecida como “*stretch magic*”. A OF foi fixada em uma fita, através de uma máquina de costura de ponto ziguezague. Importante mencionar que a OF ficou “encapsulada” (termo usado pelos autores) por dentro dos pontos de costura. Ou seja, a OF não foi propriamente costurada, mas ficou “presa” por baixo dos pontos em ziguezague à medida que os mesmos eram formados. Os autores tiveram êxito em desenvolver este

sensor têxtil para detectar tensões musculares a partir de mudanças na sua forma, durante uma atividade física com envolvimento de peso.

Issatayeva *et al.* (2019) desenvolveram um têxtil inteligente com sensor de temperatura fixado em substrato têxtil através do método de costura manual. Ao final, o sensor demonstrou sensibilidade em leituras de variação de temperatura.

Em sua pesquisa, Seng *et al.* (2021) desenvolveu um sensor de OF para medição da dinâmica de impacto, usando o método de costura manual de OF em tecido de para-aramida. A medição, que relacionava a deformação da OF à deformação de impacto, foi realizada com êxito.

Em outra investigação de Issatayeva *et al.* (2021), foi elaborado um têxtil inteligente para o monitoramento contínuo da frequência respiratória, embutindo OFs em um cinto elástico, inserido sobre o tórax e abdômen de um indivíduo, através de costuras manuais. Um algoritmo foi usado para analisar o padrão de deformação durante a respiração detectado pelas OFs. Os experimentos mostraram que as OFs integradas ao têxtil podem servir como uma tecnologia promissora para monitoramento contínuo da frequência respiratória.

Conforme verificado, os estudos que relacionam especificamente a introdução de fibra ótica a partir da técnica de costura, realizam ou por meio de costura manual, ou através de “encapsulamentos” da fibra ótica feitos com ponto de costura zigzague. O método utilizado pela técnica de costura a ser tratado no presente trabalho será diferente dos métodos encontrados na literatura até o momento, uma vez que a fibra ótica foi inserida mecanicamente usando uma máquina de costura. O Quadro 1 apresenta, de maneira sintetizada, os principais tópicos verificados nos artigos científicos analisados.

Quadro 1 – Levantamento de artigos sobre têxteis inteligentes a partir de OFs

(continua)

Nº	Título do artigo (em inglês)	Funcionalidade da OF	Área	Técnica têxtil de inserção	Tipo de OF	Diâmetro da OF	Combinação de OF com filamentos têxteis	Referências
1	<i>Light-emitting fabrics for photodynamic therapy</i>	Luminescência	Saúde	Tecelagem plana	POF	250 µm	PES 330 dtex	OGUZ <i>et al.</i> 2016
2	<i>Using optical fibers in the design of new-born children. Clothes for the treatment of jaundice</i>	Luminescência	Saúde	Malharia por urdume	POF	2,0 mm	-	RAMAD <i>et al.</i> 2017
3	<i>Development of polymeric optical fibre fabrics as illumination elements and textile displays</i>	Luminescência	<i>Design</i>	Tecelagem Plana	POF	0,06 e 0,125 mm	-	HARLIN; MÄKINEN; VOURIVIRTA. 2003
4	<i>Flat Knitting of a light emitting textile with optical fibres</i>	Luminescência	<i>Design</i>	Malharia por trama (retilínea)	POF	0,25 e 0,75 mm	-	OSCARSSON <i>et al.</i> 2009
5	<i>Knitting with optical fibers</i>	Luminescência	<i>Design</i>	Malharia por trama (retilínea)	POF	0,25 mm	-	MARTENS; WEHLAGE; EHRMANN, 2016
6	<i>An analysis on the luminance efficiency of the machine embroidery method applied to flexible plastic optical fiber for realization of the textile display</i>	Luminescência	<i>Design</i>	Bordado	POF	1,5 mm	Fios têxteis	YANG; CHO, LEE, 2018
7	<i>The design and development of an illuminated polymeric optical fibre (POF) knitted garment</i>	Luminescência	<i>Design</i>	Malharia por trama (retilínea)	POF	0,25 mm	Fio acrílico de 2/15 Nm	CHEN <i>et al.</i> 2020

Quadro 1 – Levantamento de artigos sobre têxteis inteligentes a partir de OFs

(continua)

Nº	Título do artigo (em inglês)	Funcionalidade da OF	Área	Técnica têxtil de inserção	Tipo de OF	Diâmetro da OF	Combinação de OF com filamentos têxteis	Referências
8	<i>Structural Health Monitoring Using Textile Reinforcement Structures with Integrated Optical Fiber Sensors</i>	Sensor	Construção civil	Malharia por urdume	Vidro	-	Multifilamento de vidro de 2.400 tex e multifilamento de polipropileno 44 tex	BREMER <i>et al.</i> 2017
				Bordado	Vidro		Filamentos de carbono	
9	<i>A novel periodic macrobending hetero-core fiber optic sensor embedded in textiles</i>	Sensor	Saúde	-	Vidro	62,5 / 125 µm	-	ALEMDAR <i>et al.</i> 2013
10	<i>Textile fiber optic microbend sensor used for heartbeat and respiration monitoring</i>	Sensor	Saúde	-	Vidro	Núcleo 50 µm; revestimentos: 124,8 µm e 246,6 µm	-	YANG <i>et al.</i> 2014
11	<i>Smart textile using hetero-core optical fiber for heartbeat and respiration monitoring</i>	Sensor	Saúde	Tecelagem plana	Vidro	9/125 + 5/125 µm	Lã	KOYAMA; NISHIYAMA; WATANABE, 2018
12	<i>Polymeric optical fiber-based sensor for simultaneous measurement of breath and heart rate under dynamic movements</i>	Sensor	Saúde	-	POF	Núcleo: 980 µm; revestimento: 20 µm	Revestimento de polímero fluorado e polietileno	LEAL-JUNIOR <i>et al.</i> 2019
13	<i>Stretchable optical fibers: threads for strain-sensitive textiles</i>	Sensor	Saúde	Costura	POF	0,50 mm a 1,8 mm	Revestimento de poliuretano e silicone	HARNETT; ZHAO; SHEPHERD, 2017
14	<i>Design of a temperature-sensing smart textile based on Fiber Bragg Grating sensor in CYTOP fiber.</i>	Sensor	Saúde	Costura	-	-	-	ISSATAYEVA <i>et al.</i> 2019

Quadro 1 – Levantamento de artigos sobre têxteis inteligentes a partir de OFs

(conclusão)

Nº	Título do artigo (em inglês)	Funcionalidade da OF	Área	Técnica têxtil de inserção	Tipo de OF	Diâmetro da OF	Combinação de OF com filamentos têxteis	Referências
15	<i>Fiber-optic based wearables for the continuous monitoring of respiratory rate</i>	Sensor	Saúde	Costura	Vidro	-	-	ISSATAYEVA <i>et al.</i> 2021
16	<i>Dynamic back face deformation measurement with a single optical fibre</i>	Sensor	Saúde	Costura	-	-	Método de costura manual	SENG <i>et al.</i> 2021

Fonte: elaborado pelo autor

A partir do levantamento de artigos científicos sobre têxteis inteligentes e OFs apresentados no Quadro 1, geram-se subsídios para a definição do tema da presente dissertação. Sendo assim, a partir do total de estudos investigados que utilizam OFs, é possível concluir:

- a) 56,3 % dos estudos são relacionados a sensores e 43,7 % à luminescência;
- b) 56,3 % dos estudos trabalham com a POF, 31,3 % com a OF de vidro e 2,4 % não mencionam o tipo de fibra ótica utilizada.

A partir dos estudos que utilizaram POFs, também é possível concluir:

- a) 55,6 % são relacionados à luminescência e 44,4 % a sensores;
- b) do total que tratam de luminescência, 71,4 % são referentes à área de *design* e 28,6 % à área da saúde;
- c) do total de estudos que envolvem a área têxtil e POF, 33,35 % utilizam a malharia por trama (retilínea); 22,25 % tecelagem plana; 11,1 % malharia por urdume; 11,1 % bordado; 11,1 % costura e 11,1 % dos trabalhos não especificou a área têxtil utilizada;
- d) do total de estudos que envolvem a costura, 25 % utilizam POF, 25 % OF de vidro e nos outros 50 % não foram especificados qual o tipo de fibra ótica. Todos os estudos estão direcionados a sensores para a área da saúde.

## 2.4 TÉCNICA DE COSTURA

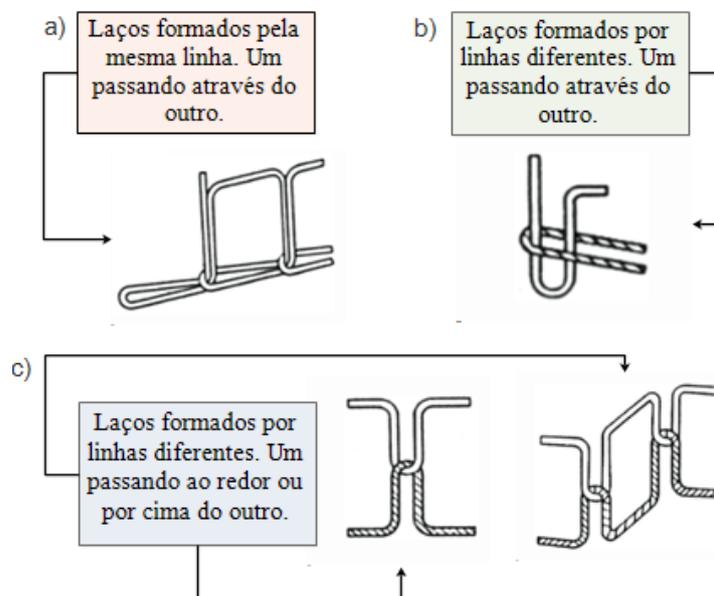
Conforme a NBR 9397, de 1986 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986) a costura pode ser definida como a aplicação de vários tipos de pontos em uma ou mais camadas de materiais (previamente cortados). De acordo com Araújo (1996), a tecnologia de costura consiste em juntar materiais bidimensionais e assim formar uma peça tridimensional. Além disso, os pontos de costura também podem ser utilizados como ornamento, caseados, bainhas, entre outros. Para Jana (2015), o processo responsável pela formação de pontos através da utilização de agulha e linha é chamado de costura. Segundo Colovic (2015) costurar é a atividade mais relevante para se construir uma peça de vestuário e produtos semelhantes. A costura ocorre através do envolvimento da agulha, linha, laçadas de linha, materiais previamente cortados, que são juntados manualmente ou

através de máquina. Tanto o tipo de costura, quanto o ponto em si, está ligado à qualidade do produto final, impactando em propriedades como: resistência, durabilidade, elasticidade, segurança e aparência. Dependendo do resultado que se pretende obter no produto final, determinados tipos e pontos de costura são selecionados.

#### **2.4.1 Pontos de costura**

De acordo com a NBR 13096, de 1994 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994) um ponto de costura pode ser definido como a unidade decorrente da junção de uma ou mais linhas de fios ou laços/laçadas provenientes destas linhas, seguindo três princípios: *intralooping* (enlaçada entre si), *interlooping* (entrelaçamento com outra linha) e *interlacing* (entrelaçamento simples) conforme pode ser visto na Figura 7. O ciclo completo do entrelaçamento da linha de costura, junto ao material e demais elementos diretamente envolvidos na formação da laçada, são responsáveis pela formação do ponto de costura. A formação do ponto de costura pode ocorrer de quatro modos: sem material, dentro do material, através do material e sobre o material. Propriedades relevantes no que se refere aos pontos são: seu comprimento (pontos por unidade de comprimento), largura e profundidade; e sua consistência, que é determinada pela sua uniformidade em uma fileira. A qualidade da costura é resultante da compatibilidade entre o substrato fibroso a ser costurado, tipo de ponto, agulha, linha, máquina e regulagens (ARAÚJO, 1996).

Figura 7 – *Intralooing* (a), *Interlooping* (b), e *Interlacing* (c)



Fonte: adaptado de NBR 13096 (1994)

Segundo a NBR 13483, de 1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995), os pontos de costura estão agrupados em seis classes. Cada classe contém três algarismos. O primeiro algarismo é responsável pela definição da classe de pontos. Já o segundo e o terceiro são responsáveis pela definição dos diversos tipos de pontos (Tabela 2).

Tabela 2 – Classes de pontos de costura

(continua)

Classe	Nomenclatura	Tipo	Características
Classe 100	Ponto corrente	101, 102, 103, 104, 105, 107, 108	Entrelaçamento de uma ou mais linhas entre si
Classe 200	Ponto feito à mão, originalmente	201, 202, 204, 205, 206, 209, 211, 213, 214, 215, 217, 219, 220	Formado por uma única linha (carreira de linha)
Classe 300	Ponto fixo	301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327	Entrelaçamento da linha da agulha (podendo ser mais que uma) na linha da bobina
Classe 400	Ponto corrente de duas ou mais linhas	401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417	Diferencia-se da classe 100 devido a uma lançadeira inferior que equilibra o ponto

Tabela 2 – Classes de pontos de costura

<b>(conclusão)</b>			
<b>Classe</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Tipo</b>	<b>Características</b>
Classe 500	Ponto corrente de acabamento de bordas – chuleio ( <i>overlock</i> )	501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 521	Os laços do grupo de linhas devem passar pela borda do material, entrelaçando-se entre si
Classe 600	Ponto corrente de cobertura	601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609	Utiliza duas e quatro linhas de agulha, uma linha de lançadeira inferior e uma ou duas linhas de lançadeira superior

Fonte: adaptado de NBR 13483 (1995)

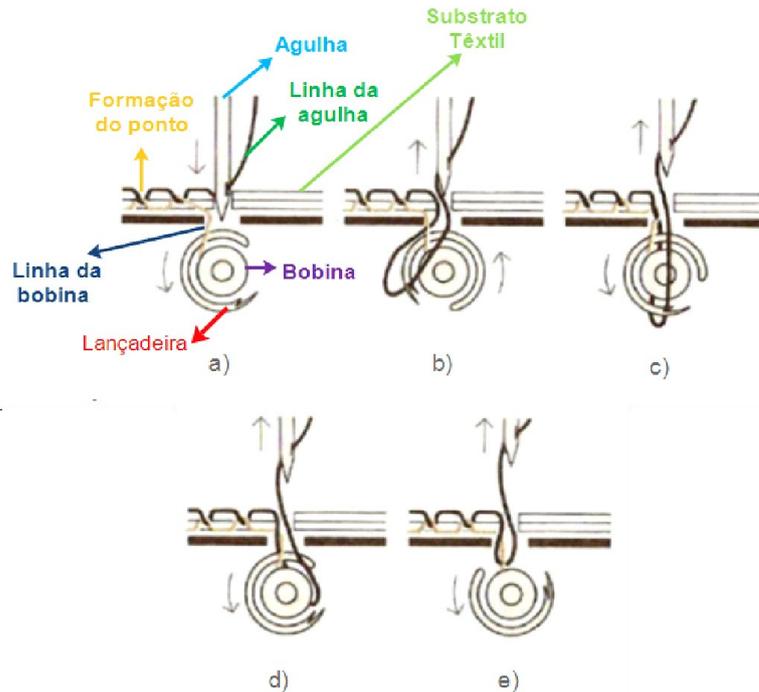
#### 2.4.2 Classe de ponto 300

Conforme Colovic (2015) esta é a classe mais comum devido à sua frequência de utilização. Os pontos dessa classe são formados a partir da linha inserida na agulha e na bobina, ou seja, a agulha atravessa o material que está sendo costurado, levando a linha até o alcance da linha da bobina que vem por baixo do material que está sendo costurado. Uma máquina de ponto fixo tem capacidade de costurar uma peça completa, amplamente utilizado na costura de golas, bolsos, mangas, revestimentos entre outros. O tipo de ponto 301 é o mais simples da classe 300 e o tipo 304 é a sua versão zigzague, utilizado como ponto decorativo, sendo comum na junção de rendas e elásticos de *lingerie*.

#### 2.4.3 Formação de ponto de costura da máquina reta

Os principais componentes mecânicos deste tipo de máquina são: lançadeira, bobina e caixa de bobina (JANA, 2015). A seguir, a descrição da formação dos pontos de costura da máquina reta, conforme ilustrado na Figura 8: a) a agulha atravessa o substrato têxtil para levar a linha superior à bobina; b) linha superior forma uma laçada que fica presa na lançadeira; c) o gancho da lançadeira faz passar a laçada sob a caixa da bobina; d) laçada se solta, ficando presa à linha da bobina; e) as linhas são puxadas para cima e introduzidas no substrato têxtil.

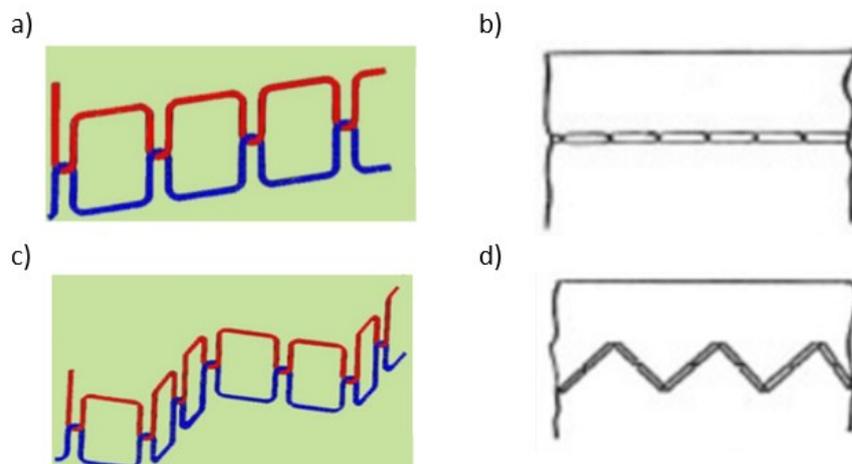
Figura 8 – Formação de ponto de costura (máquina reta)



Fonte: adaptado de Puff (2021)

A Figura 9 apresenta a formação dos tipos de pontos de costura 301 (reto) e 304 (ziguezague), bem como a aparência superior de ambos.

Figura 9 – Formação do ponto de costura do tipo 301 (a) e aparência superior (b), formação do ponto de costura do tipo 304 (c) e aparência superior (d)



Fonte: adaptado de NBR 13483 (1995)

Embora a literatura tenha mencionado sobre os estudos que tratam da utilização de POF de PMMA com 0,25 mm de diâmetro inserida a partir de técnicas têxteis, foram observadas certas lacunas, como por exemplo a ausência de estudos sobre a caracterização de POFs quando utilizadas em materiais fibrosos. Outra oportunidade é com relação a não existência de estudos específicos sobre o desenvolvimento de têxteis inteligentes através da inserção de POF pela técnica de costura. Os trabalhos mais próximos neste sentido exploram a utilização de OFs de vidros para sensores destinados à área da saúde, através da costura manual e outros tipos de adaptações, como por exemplo um tipo de colagem de sensores de OFs em meias (ISSATAYEVA *et al.* 2021; NAJAFI *et al.* 2017). Com relação a avaliação de luminância, o estudo mais próximo foi o de Yang, Cho e Lee (2018) que tinha como objetivo validar dois tipos de POFs (um flexível e outro não flexível) e também avaliar a luminância de quatro tipos de desenhos obtidos através da técnica de bordado. Neste trabalho, os autores utilizaram um *software* disponível no mercado para avaliar a luminância e por fim verificar qual tipo de desenho (com seus respectivos ângulos) e tipo de POF trariam o melhor resultado. Se tratando da presente dissertação, o método de inserção mecânica da POF por intermédio de uma máquina de costura reta, juntos aos ensaios de caracterização como: lavagem e secagem; resistência à abrasão pelos métodos Martindale e Pilling box e avaliação da transmissibilidade de luz e intensidade de luminância através do uso de um *software* desenvolvido especificamente para este trabalho, são os grandes diferenciais.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste item encontram-se descritos os materiais e métodos empregados durante o desenvolvimento do presente trabalho. Antes de realizar os métodos relativos à caracterização da POF, o primeiro desafio foi desenvolver um método para introduzir mecanicamente a POF através da técnica de costura com a finalidade de desenvolver um têxtil inteligente. Após atestar o método de transmissibilidade de luz pela POF já costurada sobre o substrato têxtil, o próximo desafio foi desenvolver um método para avaliar a intensidade de luminância antes e após os ensaios definidos

para a caracterização da POF (lavagem e secagem e resistência abrasão pelos métodos Martindale e Pilling box).

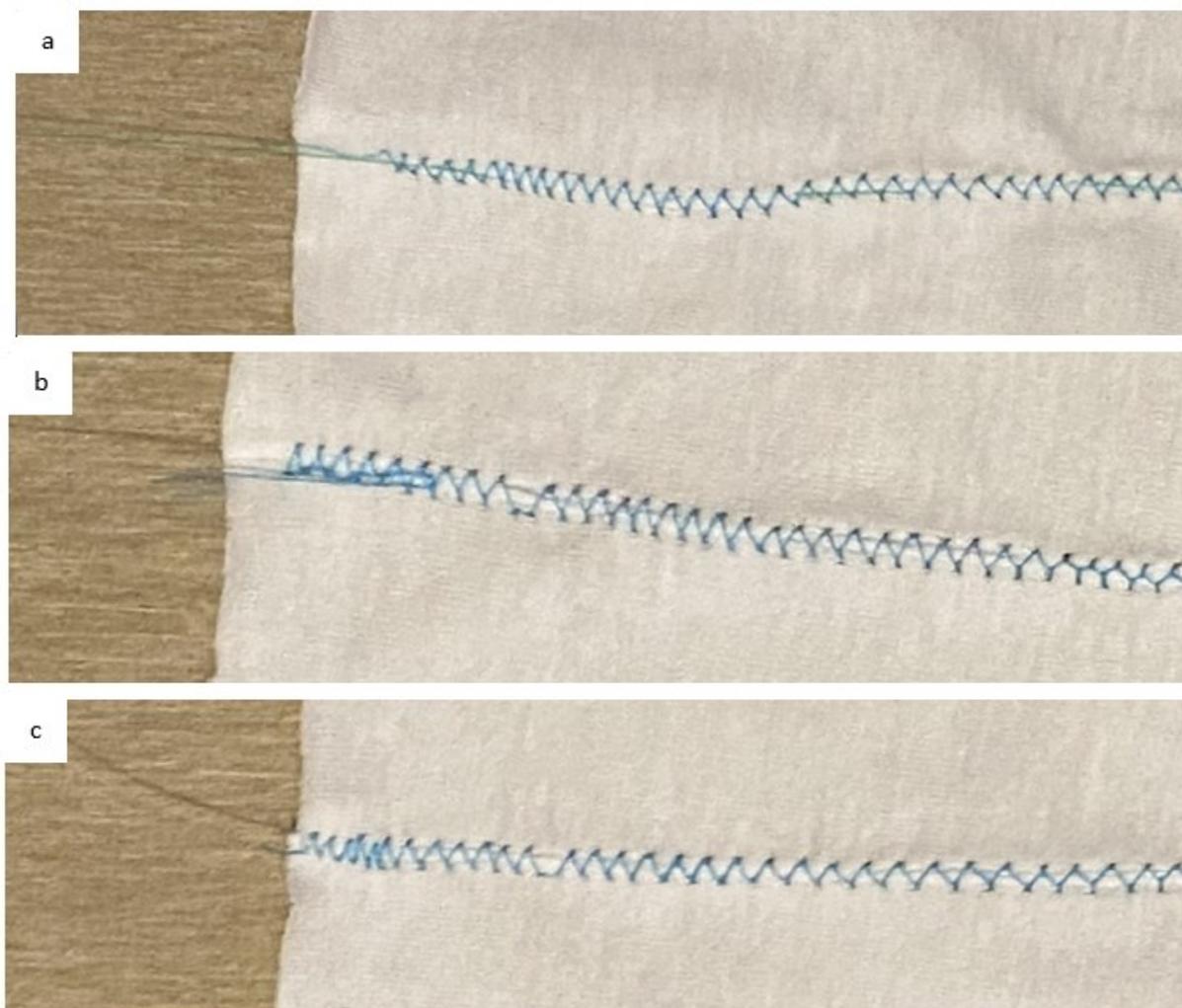
### 3.1 ENSAIOS PRÉVIOS

Para a determinação do método de inserção da POF pela técnica de costura, foram realizados ensaios prévios de costurabilidade, sendo que para cada um destes empregaram-se tipos específicos de OFs (de vidro SM e MM) e POF (de PMMA com 0,25 mm de diâmetro). O substrato têxtil que serviu de base para as costuras foi uma estrutura *jersey* de composição 100 % algodão (CO) na cor branca. Para a costura foi utilizada uma máquina reta doméstica de modelo 2250 e agulha Nº 80, ambas da marca Singer® e linha de costura de composição 100 % PES fiado da marca Sancris®.

#### 3.1.1 Ensaio prévio de costurabilidade (método 1)

No método 1 foi depositada uma OF de vidro do tipo SM de 10 cm de comprimento sobre o substrato têxtil e costuraram-se pontos do tipo 304 (ziguezague) de modo que a OF ficasse por debaixo desta costura. Na sequência, utilizou-se este mesmo método para com a OF de vidro do tipo MM e por fim com a POF de PMMA (Figura 10).

Figura 10 – Ponto do tipo 304 (zigzague) costurado sobre: OF de vidro SM (a), OF de vidro MM (b), e POF de PMMA (c)



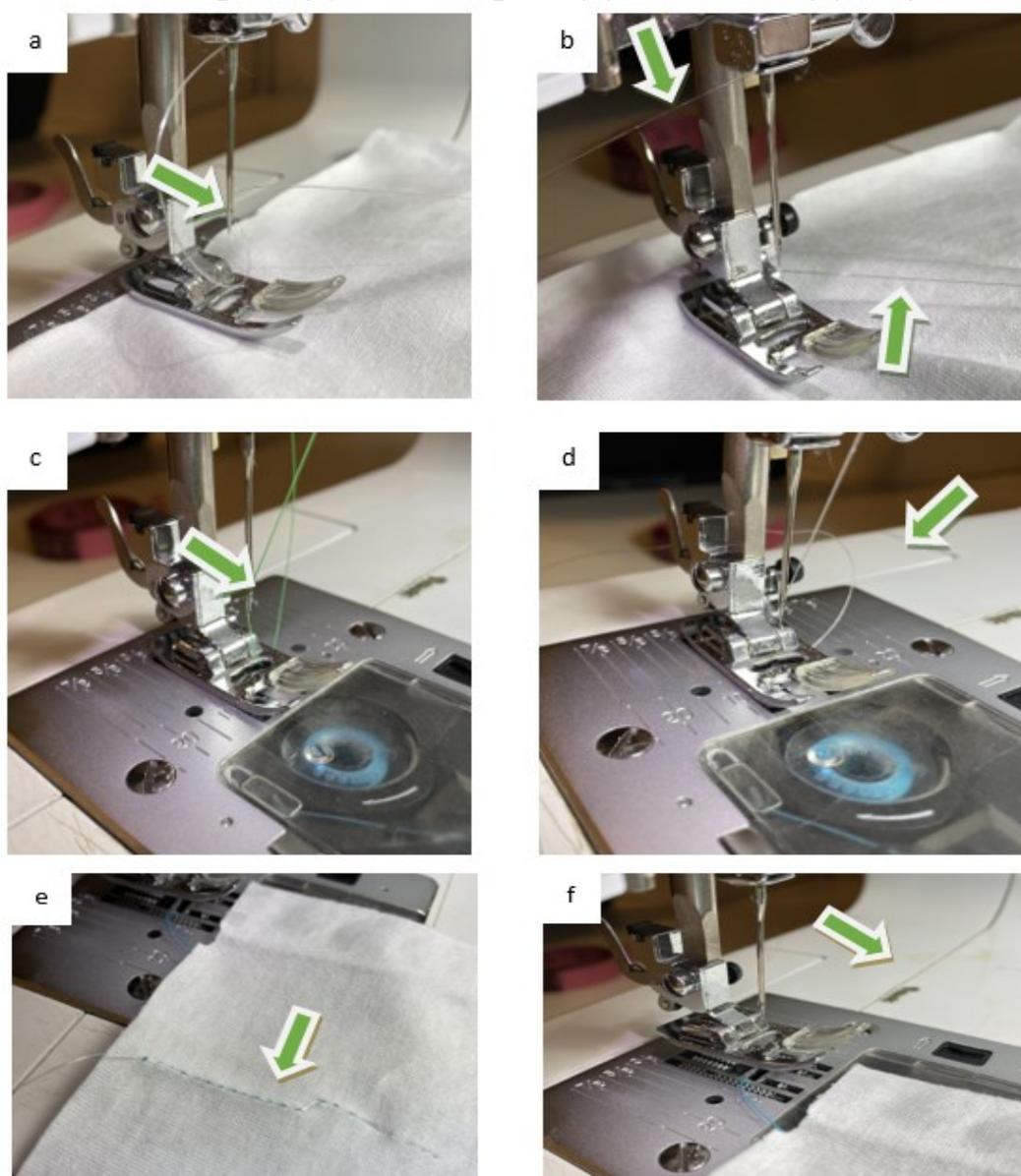
Fonte: elaborado pelo autor

### 3.1.2 Ensaio prévio de costurabilidade (método 2)

No método 2, uma OF de vidro do tipo SM foi inserida no orifício da agulha da máquina de costura (Figura 11a); em seguida, girou-se manualmente o volante da máquina afim de fazer o movimento de sobe e desce da agulha, porém entre o primeiro e segundo giro do volante, ocorreu a ruptura da OF (Figura 11b) não formando os pontos da costura. Na sequência, utilizou-se este mesmo método com a OF de vidro do tipo MM, ou seja, a OF foi introduzida no orifício da agulha (Figura 11c) e em seguida, girou-se o volante de modo manual. O comportamento resultante foi análogo ao caso anterior. Por fim, a POF de PMMA também foi submetida ao mesmo

método, primeiramente introduziu-se a POF no orifício da agulha (Figura 11d), girou-se o volante para movimentá-la e como desta vez não ocorreu a ruptura da POF, então ligou-se a máquina. Sendo assim, iniciou-se o processo mecanicamente, obtendo-se uma costura de aproximadamente 3 cm de comprimento (Figura 11e), na sequência ocorreu a ruptura da POF não sendo possível realizar costuras maiores que o comprimento de 3 cm (Figura 11f).

Figura 11 – OF de vidro SM na agulha (a), e sua ruptura (b); OF de vidro MM na agulha (c); POF na agulha (d), sua costura (e) e ruptura POF (f)

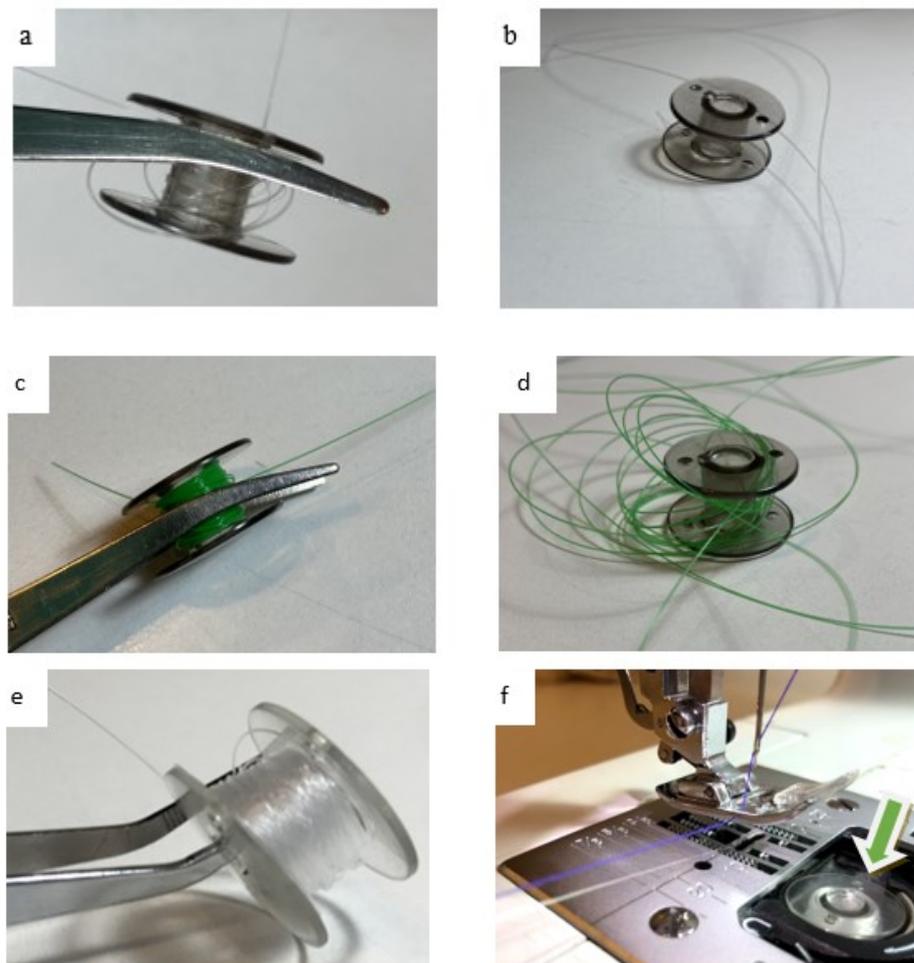


Fonte: elaborado pelo autor

### 3.1.3 Ensaio prévio de costurabilidade (método 3)

No método 3, alimentou-se a bobina da máquina de costura com OF de vidro SM (Figura 12a), porém instantes depois ela desenrolou-se (Figura 12b). Na sequência, utilizou-se este mesmo método com a OF de vidro do tipo MM (Figura 12c) e o comportamento foi análogo ao caso anterior (Figura 12d). Por fim, empregou-se este mesmo método para com a POF de PMMA, entretanto, neste caso, obteve-se êxito (Figura 12e). Foram enrolados aproximadamente 50 cm de POF em torno do eixo da bobina e na sequência a mesma foi encaixada na máquina, que ficou preparada para a operação de costura (Figura 12f).

Figura 12 – OF de vidro SM enrolada na bobina (a) e desenrolada (b); OF de vidro MM enrolada na bobina (c) e desenrolada (d); POF enrolada na bobina (e), e bobina encaixada na máquina (f)



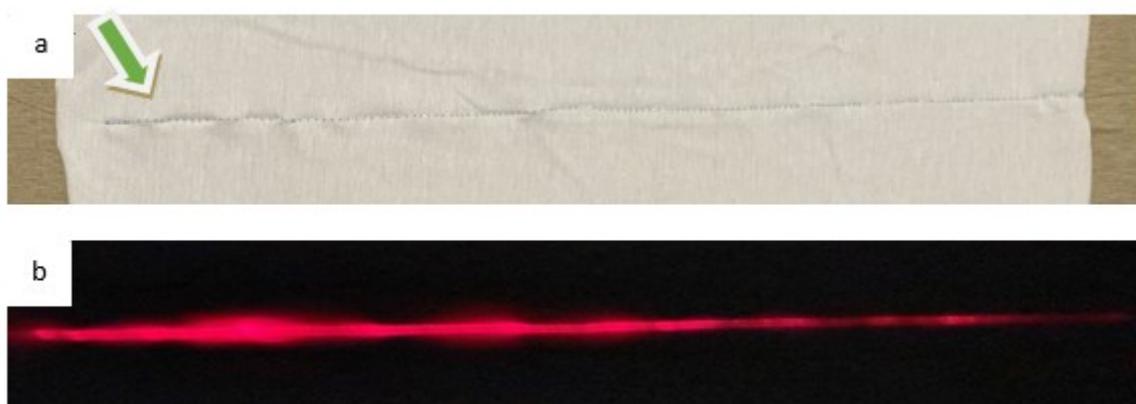
Fonte: elaborado pelo autor

Em seguida, com a POF de PMMA na bobina da máquina, costurou-se com o tipo de ponto 301 (classe 300) uma reta de 50 cm de comprimento.

### 3.1.4 Ensaio prévio de transmissibilidade de luz

Posteriormente, realizou-se o ensaio de transmissibilidade de luz para esta mesma amostra, POF de PMMA e o tipo de ponto 301 (classe 300). O laser emissor de luz constante foi conectado na ponta da POF (deixada para esta finalidade), em seguida ligou-se este equipamento e a luz foi transmitida de uma extremidade a outra (Figura 13).

Figura 13 – Ensaio de costurabilidade da POF no método 3 (a), e ensaio de transmissibilidade de luz (b)



Fonte: elaborado pelo autor

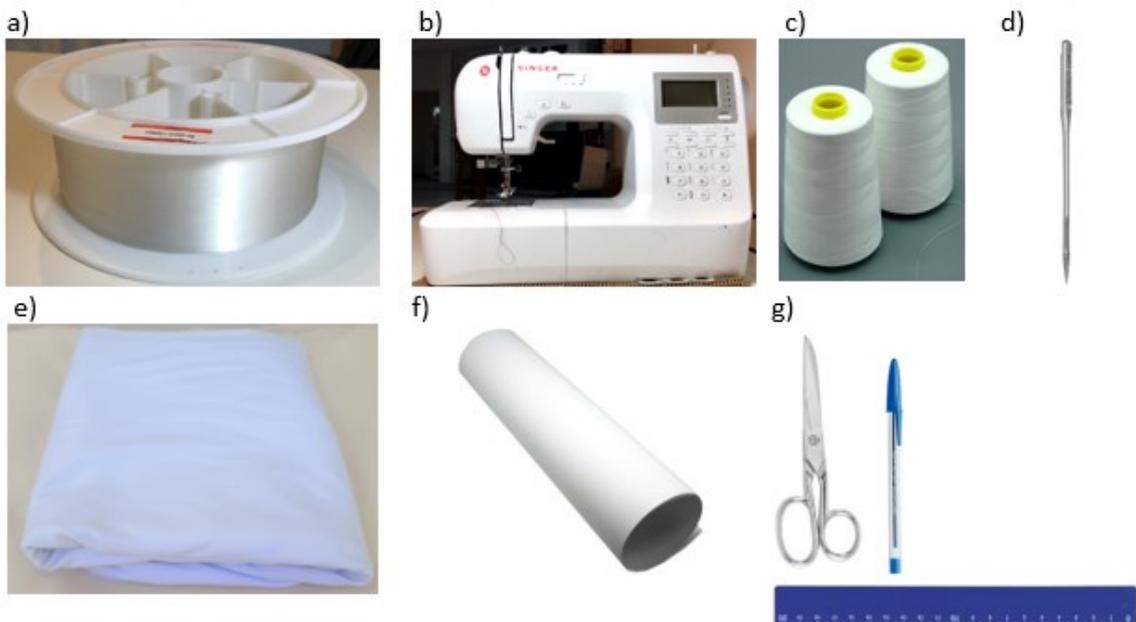
Analisando os três métodos utilizados nos ensaios prévios, selecionou-se o método 3 com a finalidade de estudá-lo em profundidade na presente dissertação. Este método foi desenvolvido a partir da utilização de POF de PMMA com 0,25 mm de diâmetro na bobina da máquina reta, utilizando o tipo de ponto 301 (classe 300). Além dos resultados dos ensaios prévios de costurabilidade e de transmissibilidade de luz, a pesquisa bibliográfica realizada também corroborou com definição em se utilizar POF de PMMA com 0,25 mm de diâmetro, uma vez que foram encontradas publicações sobre a utilização deste mesmo material e dimensões, a partir de técnicas de tecelagem, malharia por trama (retilínea) e bordado. O método 3 foi o que obteve melhor êxito em relação ao método 1, o principal diferencial do 3 foi que este teve

maior contato com a técnica de costura em si, sendo que no método 1 as OFs e POFs ficavam por baixo do ponto do tipo 304 (zigzague) além de que não ocorreram os danos mecânicos (pequenas rachaduras) formados pelo contato da agulha com a POF. Estas rachaduras são necessárias para que ocorram os vazamentos de luz, de modo a gerar luminosidade na costura. Em relação ao método 2 (que por sua vez buscou utilizar OFs e POFs através do orifício da agulha) o método 3 também obteve melhor êxito, uma vez que no método 2 a costura com POF apresentou comportamento de ruptura a cada instante, portanto não sendo possível costurar.

### 3.2 ENSAIO DE COSTURABILIDADE

Os materiais utilizados no ensaio de costurabilidade foram: POF de PMMA com diâmetro de 0,25 mm, estrutura *jersey* de composição 100 % CO, máquina reta doméstica modelo 2250 e agulha N° 80, ambas da marca Singer® e linha de costura de composição 100 % PES fiado da marca Sancris® e outros elementos como caneta, régua, compasso, cartolina e tesoura (Figura 14).

Figura 14 – Materiais utilizados no ensaio de costurabilidade: POF (a), máquina reta (b), linha (c), agulha (d), malha *jersey* (e), cartolina (f), e tesoura, caneta e régua (g)



Fonte: elaborado pelo autor

O método utilizado nos ensaios de costurabilidade foi baseado nas recomendações sobre classes e tipos de pontos de costuras da NBR 13483, de 1995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986). Primeiramente, determinaram-se as formas de desenho as quais as costuras seriam realizadas: retas, retângulos e circunferências (visando simular moldes de vestuário, com a presença de retas e curvaturas). Foram estipuladas quatro amostras de costuras do tipo de ponto 301 (classe 300) em forma de reta com 50 cm de comprimento; quatro amostras de costuras do tipo de ponto 301 (classe 300) em forma de um retângulo de 20 cm de largura x 18,5 cm de altura e quatro amostras de costuras do tipo de ponto 301 (classe 300) em forma de circunferência com 24 cm de diâmetro. As costuras das retas foram realizadas com distância de 3 cm entre elas. Para as costuras do tipo retângulo e circunferência foram utilizados moldes para se basear. Posteriormente, 100 cm de POF foram cortadas para serem enroladas em torno do eixo da bobina que ao final foi encaixada na máquina de costura, a qual recebeu as seguintes regulagens: tamanho de ponto 3,0 e tensão e velocidade baixa (ambos se referem a unidade padrão do próprio equipamento). Por fim, executou-se o processo de costura em cada uma das doze amostras. Antes do início de cada costura deixou-se uma ponta de POF de aproximadamente 15 cm, necessária para o ensaio de transmissibilidade de luz a ser realizado posteriormente. Estas mesmas amostras foram utilizadas nos ensaios de lavagem e secagem. Também foram organizadas as amostras para os ensaios de resistência à abrasão pelo método Martindale. Para isso, foram preparadas dezoito amostras da estrutura de malha *jersey* na forma de circunferência com 13 cm de diâmetro. Em seguida, foram realizadas três costuras retas sobre cada amostra, sempre deixando uma ponta inicial de 15 cm de comprimento antes de iniciar a costura. Para os ensaios de resistência à abrasão pelo método Pilling box, foram preparadas oito amostras da estrutura *jersey*, em forma de um quadrado de 12,5 cm x 12,5 cm, sobre as quais foram realizadas três costuras retas, também sempre deixando uma ponta inicial de 15 cm de comprimento antes de iniciar a costura. Importante mencionar que quatro amostras tiveram as costuras realizadas na direção das colunas da malha e as outras quatro na direção dos cursos.

### 3.3 ENSAIO DE LAVAGEM E SECAGEM

Para o ensaio de lavagem e secagem utilizaram-se as recomendações da norma internacional ISO 6330:2012 que especifica os procedimentos de lavagem e secagem para têxteis. No total, doze amostras de costura de POF foram submetidas a este ensaio. Inicialmente, colocaram-se quatro amostras de costuras do tipo reta com 50 cm em uma máquina de lavar da marca Brastemp® e o programa selecionado foi lavagem dia a dia, nível de água baixo, molho curto (lavar, enxaguar e centrifugar), sendo o tempo de duração de 35 minutos. Após a conclusão da primeira lavagem, as amostras foram colocadas em uma secadora de varal da marca Muller® para serem submetidas ao processo de secagem por 60 min a uma temperatura de 70 °C. Este ciclo de lavagem e secagem se repetiu por duas vezes. Porém, antes de iniciar o segundo ciclo, todas as amostras foram submetidas aos ensaios de transmissibilidade de luz e ao término do segundo ciclo também. A Figura 15 ilustra os materiais utilizados no ensaio de lavagem e secagem. Na sequência, este mesmo método de trabalho foi usado para com uma amostra de costura em forma de retângulo, para avaliar o seu comportamento. As amostras do grupo A que foram submetidas a diferentes quantidades de ciclos do ensaio de Martindale, também foram lavadas e secadas por duas vezes, para avaliar os seus comportamentos.

Figura 15 – Materiais utilizados no ensaio de lavagem e secagem: máquina de lavar (a) e secadora (b)



Fonte: elaborado pelo autor

### 3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO (MARTINDALE)

Para o ensaio de resistência à abrasão utilizaram-se as recomendações da norma internacional ISO 12945-2/2000, método Martindale, que avalia o quanto o tecido pode resistir ao desgaste por atrito e se há tendências de formação de *pilling*. Para a realização do ensaio através do método Martindale foram formados três grupos de amostras (Quadro 2). Cada grupo (A, B e C) foi formado por um conjunto de seis amostras onde cada uma delas foi submetida a uma quantidade determinada de ciclos: 125, 500, 1.000, 2.000, 5.000 e 7.000 ciclos. O objetivo dos três grupos: avaliar a repetibilidade dos resultados.

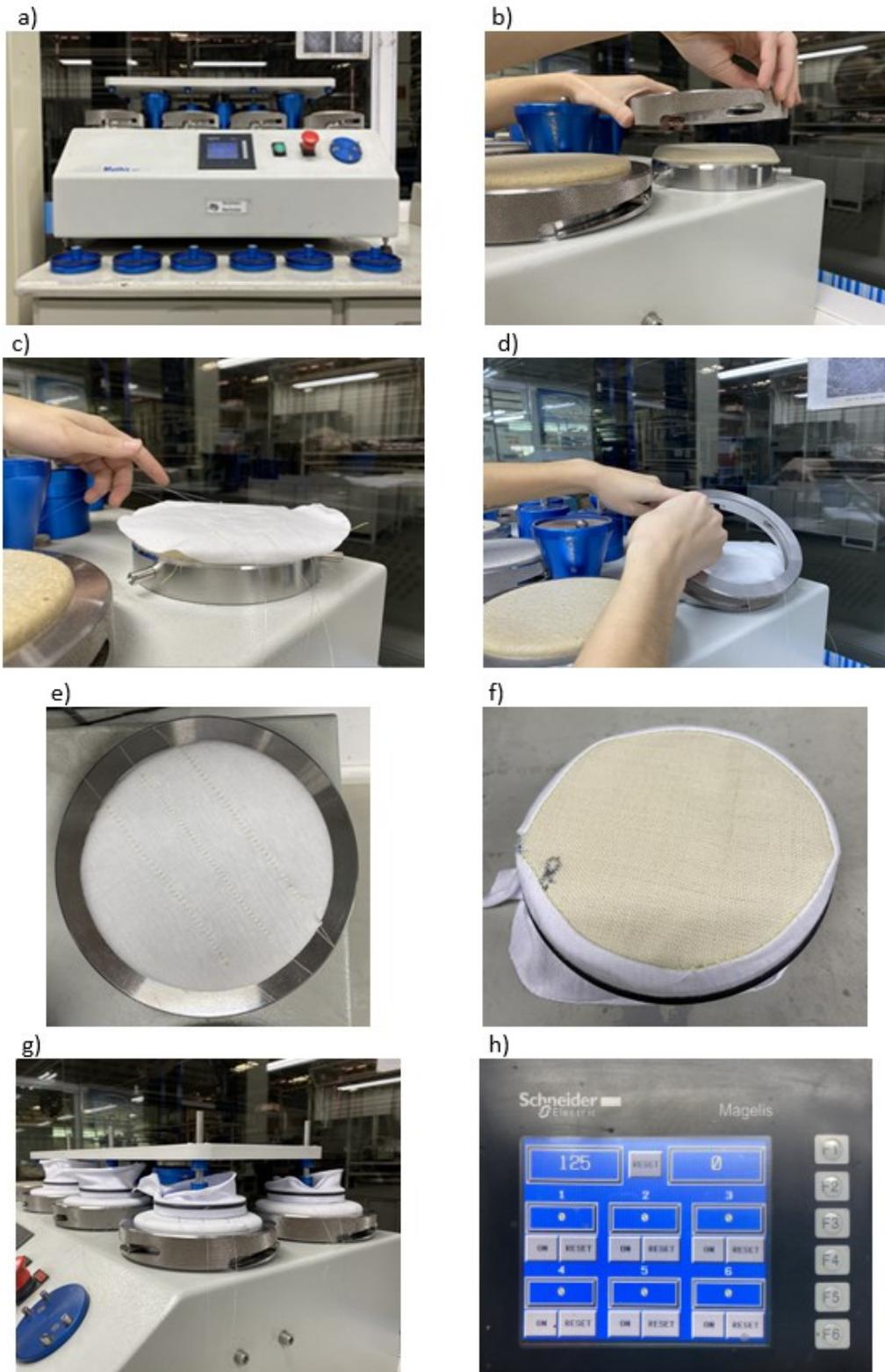
Quadro 2 – Determinação da quantidade de ciclos para as amostras de cada grupo

<b>Grupos</b>	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>	<b>Amostra 4</b>	<b>Amostra 5</b>	<b>Amostra 6</b>
<b>A</b>	125	500	1.000	2.000	5.000	7.000
<b>B</b>	125	500	1.000	2.000	5.000	7.000
<b>C</b>	125	500	1.000	2.000	5.000	7.000
<b>Duração do ensaio (min)</b>	3	12	24	48	120	168

Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 16 é possível observar as etapas do ensaio. As amostras foram inseridas sobre a base inferior (Figura 16b); na sequência, colocou-se o suporte de fixação sobre a amostra, para fixá-la (Figura 16c e Figura 16d). Já com a amostra fixa na base inferior, preparou-se a base superior inserindo o tecido abrasivo (Figura 16e). A seguir, fixou-se a base superior na chapa retangular (Figura 16g). Por fim, programou-se o equipamento Martindale conforme a quantidade de ciclos determinados.

Figura 16 – Ensaio de Martindale: equipamento (a), preparação das amostras para sua fixação (b, c, d, e), tecido abrasivo (f), equipamento atuando (g), e programação de ciclos (h)

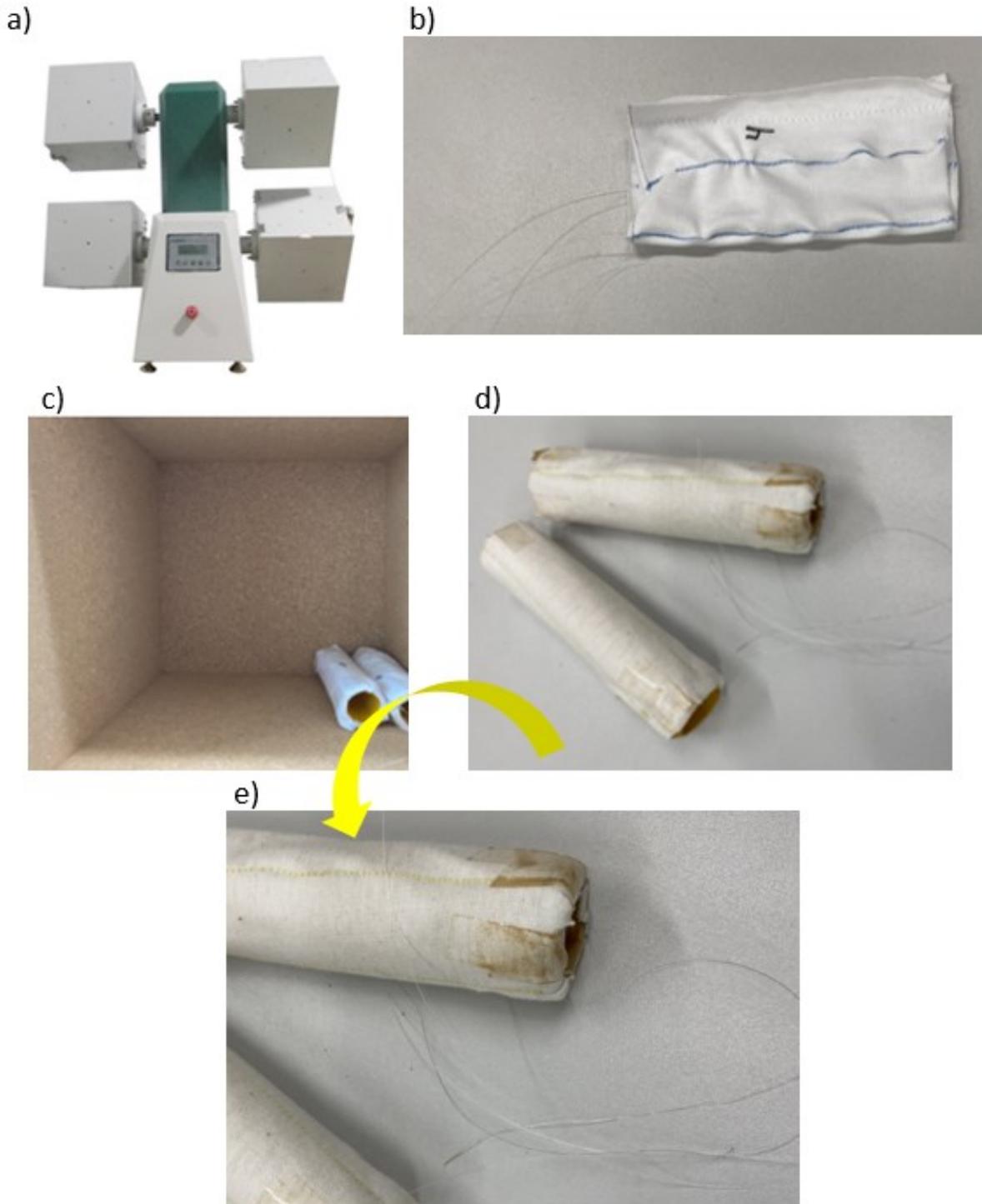


Fonte: elaborado pelo autor

### 3.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO (PILLING BOX)

Para o ensaio de resistência à abrasão pelo método Pilling box foram utilizadas as recomendações da norma internacional ISO 12945-1/2000, que avalia o quanto o tecido pode resistir ao desgaste de atrito e formação de *pilling*. Na Figura 17 é possível visualizar as etapas necessárias para a execução do ensaio. O equipamento Pilling box possui 4 *boxes* para colocação das amostras a serem ensaiadas (Figura 17a). Primeiramente, dobraram-se ao meio as amostras formando um retângulo, de modo que as costuras de POF ficassem no lado externo. Em seguida, realizou-se uma costura com máquina, 0,5 cm da borda da malha para dentro, fechando a lateral de cada uma das amostras dobradas (Figura 17b). Posteriormente, colocaram-se as amostras nos tubetes de plástico. Em seguida, os tubetes foram depositados de dois em dois dentro de cada box (Figura 17c). O equipamento foi programado para operar durante 6 horas, conforme recomendação da norma técnica. Ao final as amostras foram retiradas para fora de cada box, a fim de serem analisadas posteriormente (Figuras 17d e Figura 17e).

Figura 17 – Ensaio de Pilling box: equipamento (a), preparação das amostras (b), amostras antes do ensaio (c) e amostras após o ensaio (d, e)



Fonte: elaborado pelo autor

### 3.6 ENSAIO DE TRANSMISSIBILIDADE DE LUZ

Para os ensaios de transmissibilidade de luz foi utilizado um laser de luz constante (Figura 18) que tem como funcionalidade a emissão e distribuição de luz em uma determinada área ou superfície, câmera fotográfica e um *software* para análise de intensidade de luminância por densidade de cor expressa em pixels. De acordo com Yang, Cho e Lee (2018) a luminância pode ser definida como sendo a medida fotométrica da intensidade luminosa da luz por unidade de área, ou seja, dentro de um espaço específico.

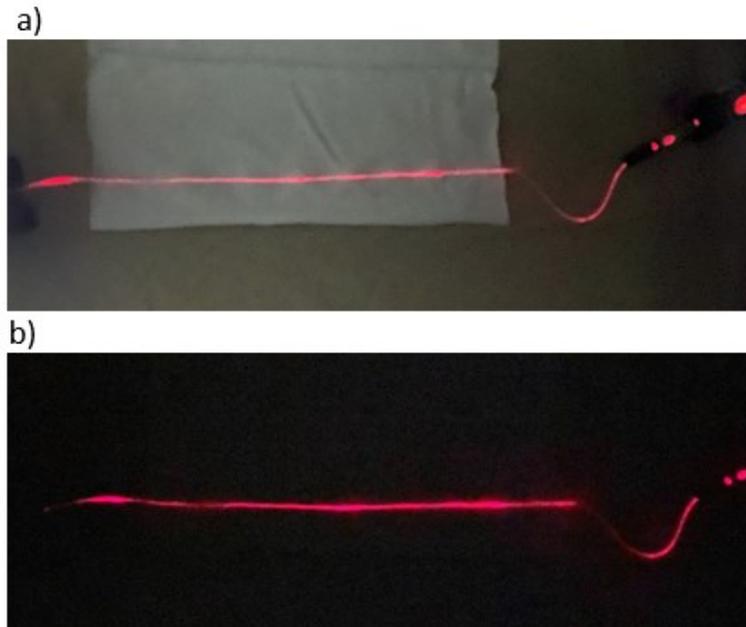
Figura 18 – Laser emissor de luz



Fonte: elaborado pelo autor

Primeiramente, conectou-se o laser emissor de luz constante na extremidade do POF, para se avaliar a transmissibilidade de luz e em seguida, cada amostra foi fotografada. Para se obter melhor qualidade das imagens, todos os ensaios foram realizados em um ambiente com luminância controlada, indicando um estado ligeiramente escuro (Figura 19).

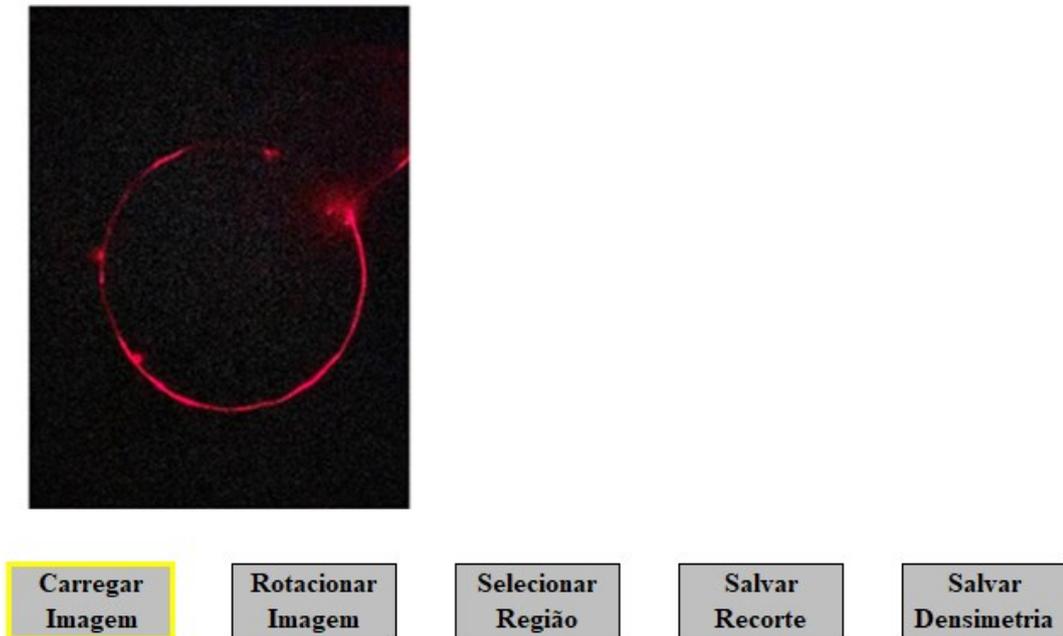
Figura 19 – Ensaio de transmissibilidade de luz: ambiente externo com iluminação (a) e ambiente externo ligeiramente escuro (b)



Fonte: elaborado pelo autor

Se tratando do *software*, este foi desenvolvido para atender as necessidades e expectativas do presente trabalho. A sua funcionalidade é dada através de um algoritmo com visão computacional cujo principal objetivo é a análise da intensidade de luminância ao longo da fibra ótica previamente costurada sobre um substrato têxtil. É importante enfatizar que ao final de cada ensaio de costurabilidade, lavagem e secagem, resistência à abrasão através dos métodos de Martindale e Pilling box, todas as amostras foram submetidas ao ensaio de transmissibilidade de luz, com o objetivo de comparar se houve ou não perda de luz. Arquivaram-se todas as imagens em um banco de dados para posteriormente serem importadas dentro do *software*. Para usar este *software*, primeiramente clicou-se sobre o botão “carregar imagem” e então a imagem foi importada (Figura 20).

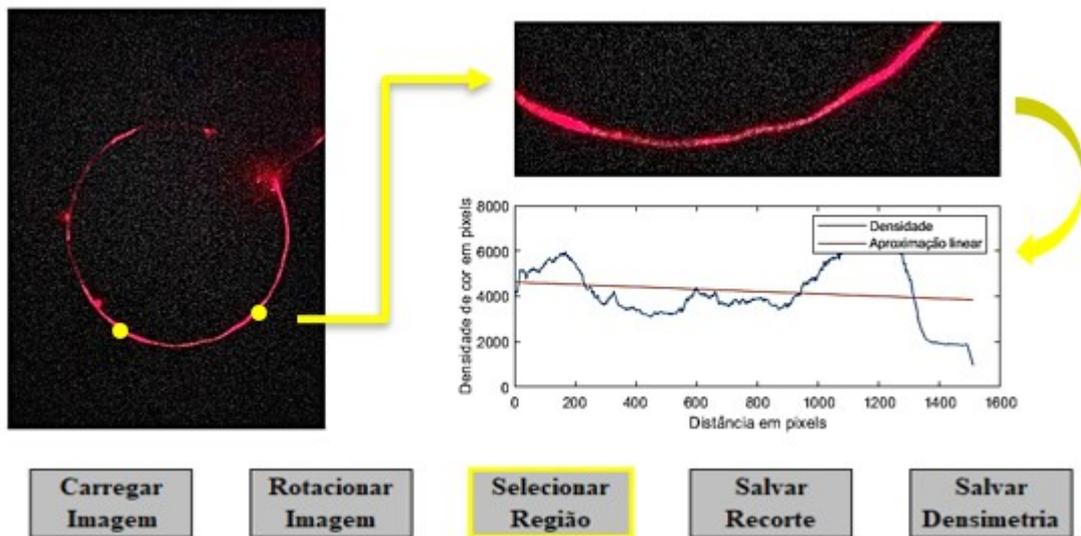
Figura 20 – *Software* avaliador de intensidade de luminância por densidade de cor em pixels



Fonte: elaborado pelo autor

Posteriormente, clicou-se sobre o botão “selecionar região” (Figura 21) e então foram determinados dois pontos sobre a imagem (um ponto inicial e um final) a fim de delimitar a região a ser mensurada a intensidade de luminância. Realizado este procedimento, o *software* gerou (Figura 21 à direita) um recorte dos pontos anteriormente delimitados, bem como um gráfico com a leitura da intensidade de luminância.

Figura 21 – Exemplo de utilização do *software* avaliador da intensidade de luminância por densidade de cor em pixels



Fonte: elaborado pelo autor

Para as amostras onde as costuras eram retas a leitura foi realizada uma única vez (amostra por amostra), bastando definir o ponto inicial e final, conforme pode ser visualizado na Figura 22. Importante mencionar que nestes casos de costuras retas estão inclusas as costuras de 50 cm, antes e após lavar e secar, e as costuras para análise de resistência à abrasão pelos métodos Martindale e Pilling box.

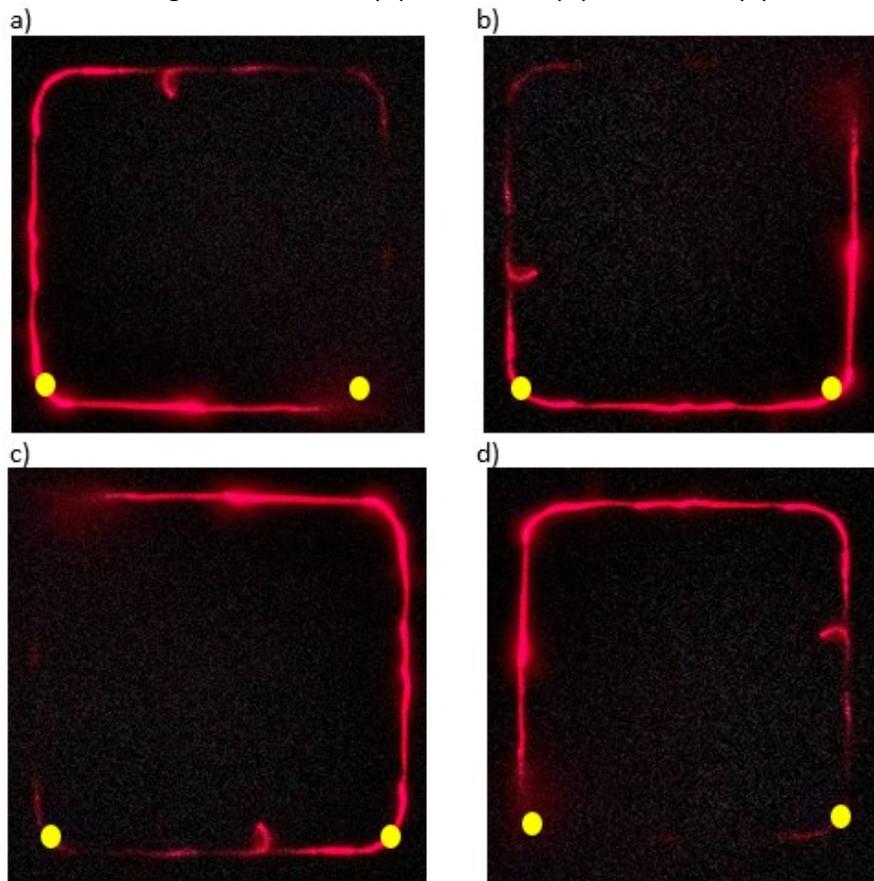
Figura 22 – Exemplo de utilização do *software* para mensurar a costura em forma de reta



Fonte: elaborado pelo autor

No caso das amostras com as costuras na forma de retângulo, a leitura da imagem foi realizada em cada aresta, rotacionando a imagem no sentido anti-horário no *software* supracitado, conforme ilustrado na Figura 23.

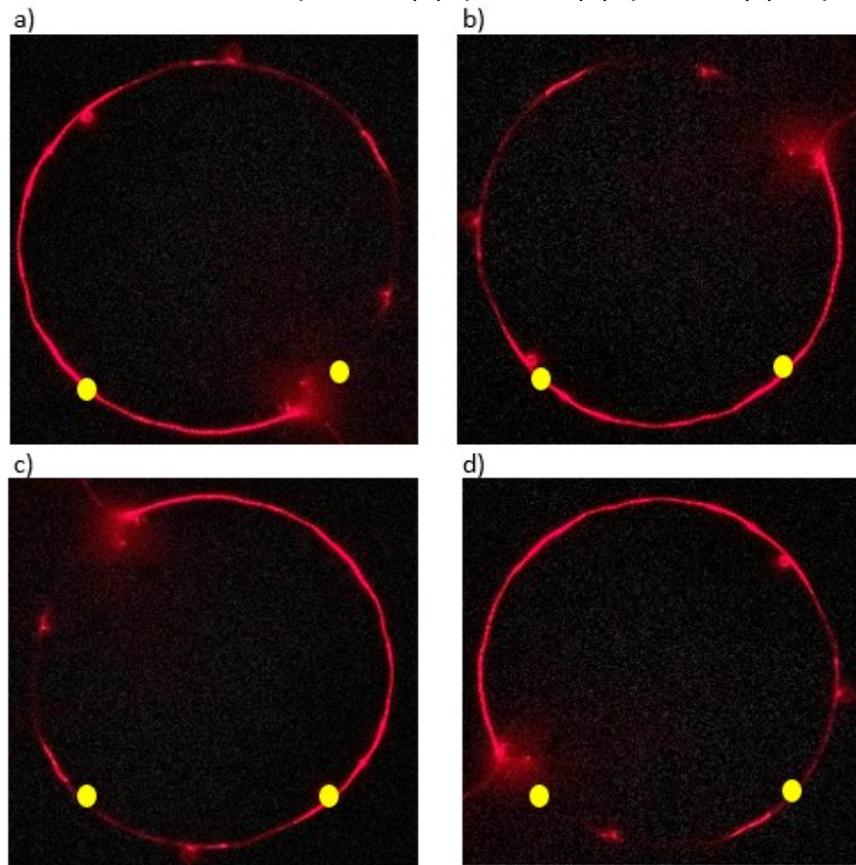
Figura 23 – Exemplo de utilização do *software* para mensurar 4 regiões da costura em forma de retângulo: aresta 1 (a), aresta 2 (b), aresta 3 (c), e aresta 4 (d)



Fonte: elaborado pelo autor

No caso das amostras com a costura na forma de circunferência, a leitura de uma mesma imagem foi realizada em quatro partes, sempre girando a imagem no sentido anti-horário até completar um ciclo, conforme verificado na Figura 24.

Figura 24 – Exemplo de utilização do *software* para mensurar 4 regiões da costura em forma de circunferência: parte 1 (a), parte 2 (b), parte 3 (c), e parte 4 (d)



Fonte: elaborado pelo autor

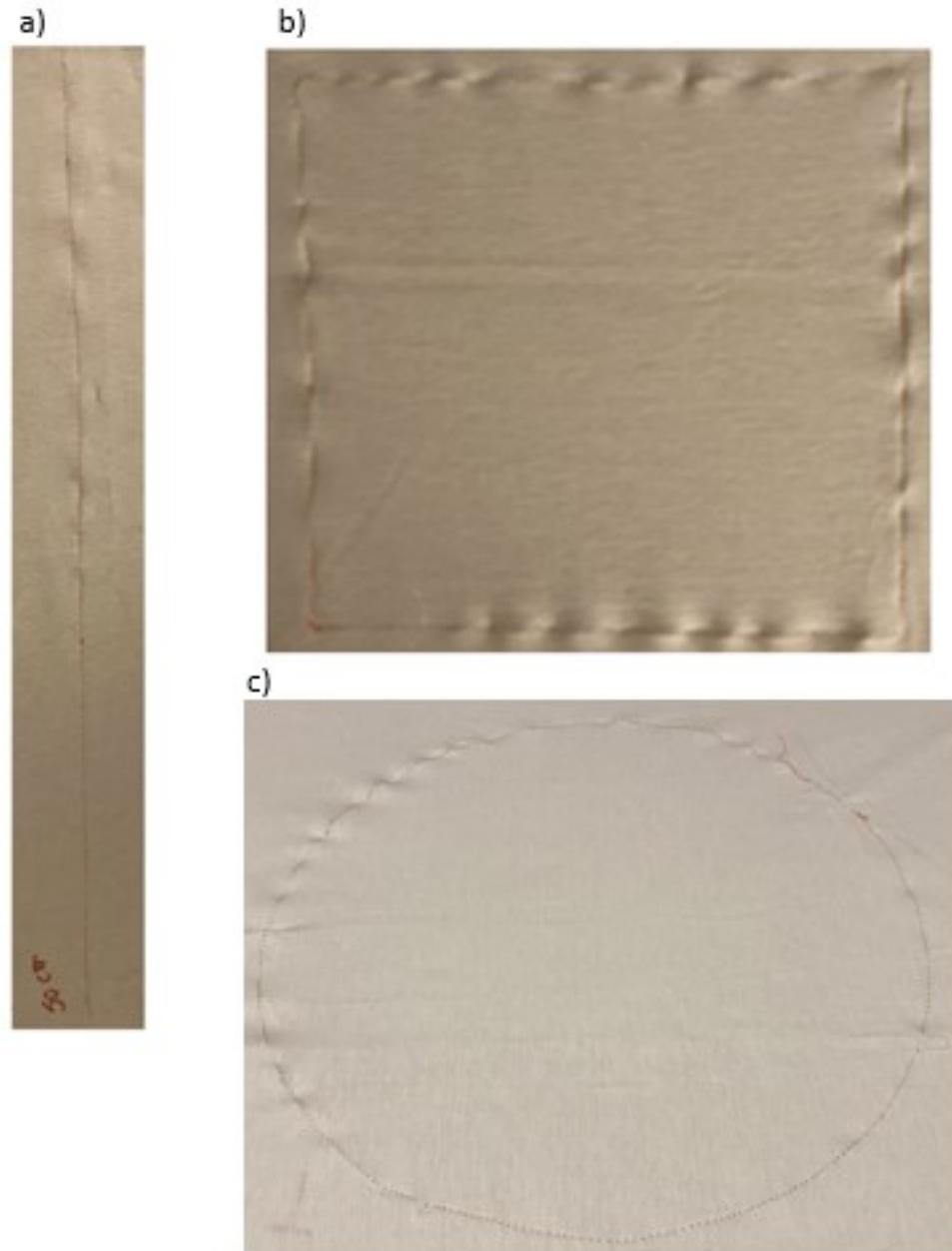
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de costurabilidade da POF, lavagem e secagem, resistência à abrasão pelo método Martindale (sem lavagem e com lavagem) e resistência à abrasão pelo método Pilling box. Todas as amostras submetidas aos ensaios aqui mencionados, também foram submetidas à avaliação da transmissibilidade de luz (laser emissor de luz constante) e análise da intensidade de luminância através de um *software* específico para esta finalidade. Todos estes resultados serão explorados a seguir.

### 4.1 ENSAIOS DE COSTURABILIDADE

Nos ensaios de costurabilidade buscou-se validar a possibilidade de costurar a partir da utilização de POF. O método 3 apresentou êxito total no processo de costura quando se utilizou a máquina reta com POF de PMMA com 0,25 mm de diâmetro na bobina da máquina. A costura do tipo de ponto 301 (classe 300) foi realizada em forma de retas, retângulos e circunferências. Durante o processo de costura não ocorreram rupturas na POF (bobina) e na linha de PES (agulha) e, portanto, o processo aconteceu sem interrupções. Como a POF apresenta rigidez maior que uma linha de costura de PES, observaram-se algumas ondulações nas costuras, o que seria o único aspecto negativo observado. Entretanto, a formação do ponto em si foi satisfatória, apresentando algumas das propriedades que foram citadas por Colovic (2015) e que estão relacionadas à qualidade, tais como resistência e aparência (Figura 25).

Figura 25 – Ensaio de costurabilidade nas formas: reta (a), retângulo (b) e circunferência (c)



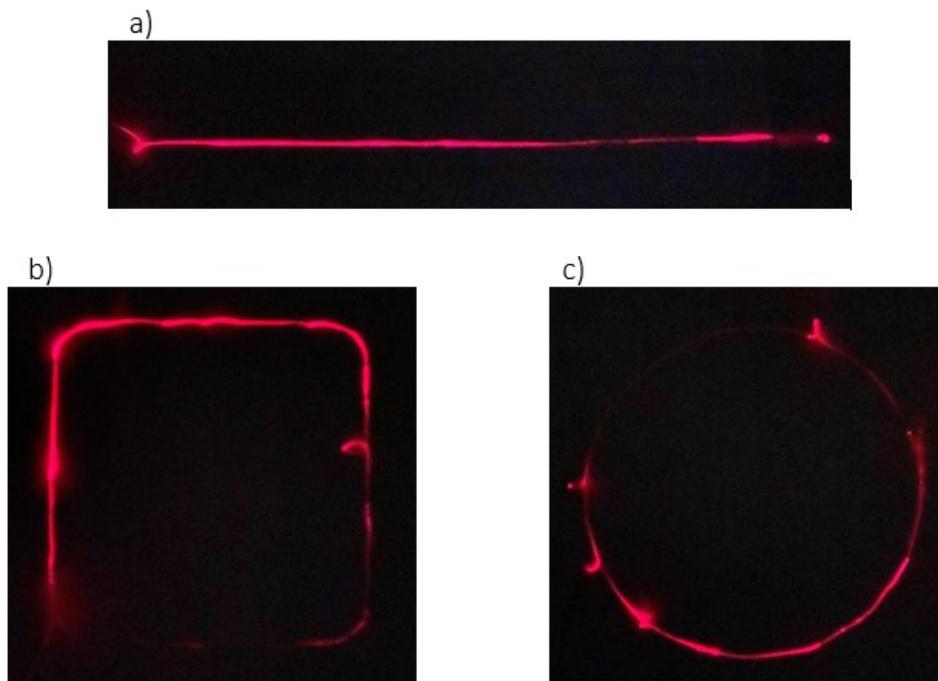
Fonte: elaborado pelos autores

#### 4.1.1 Ensaio de transmissibilidade de luz

Devido a perfuração da POF durante o processo de costura, ocorreram os danos mecânicos (pequenas rachaduras), uma vez que após a inserção de luz dentro do núcleo oco da POF, aconteceu o vazamento de luz que pode ser percebido ao longo das costuras, na Figura 26. Ressalta-se que as pequenas rachaduras

supracitadas, também foram abordadas em estudos prévios (YANG; CHO, LEE, 2018; GE, 2021). No caso da Figura 26a, a transmissibilidade de luz passou de uma extremidade a outra, sem interrupção, apesar de apresentar uma queda não acentuada na intensidade de luminância em determinadas regiões da reta. Ao analisar as Figuras 26b e 26c, aparentemente apresentaram uma boa intensidade de luminância. Nas partes ou regiões finais próximas de completar o ciclo, houve queda considerável, porém não chegou a ser um “dano crítico” termo usado pelos autores Chen *et al.* (2020) para se referenciar a um dano fatídico e impeditivo para a passagem de luz.

Figura 26 – Transmissibilidade de luz nas costuras em forma de: reta (a), retângulo (b), e circunferência (c)



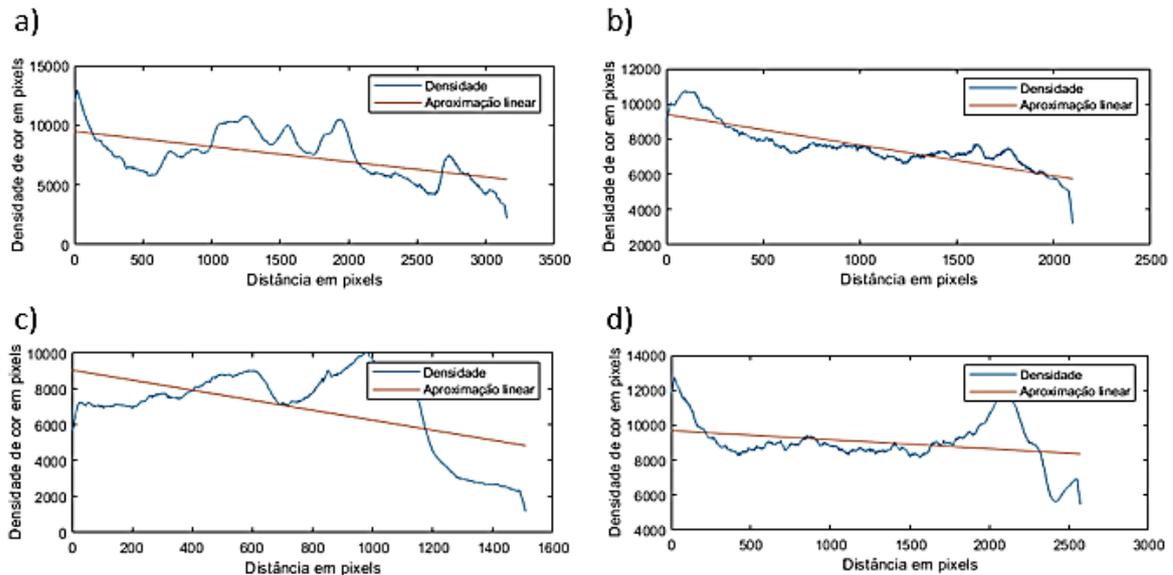
Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.1.1.1 Avaliação da intensidade de luminância nas costuras em forma de reta

Ao avaliar os gráficos gerados pelo *software* para as costuras em forma de reta (Figura 27) é possível observar detalhadamente a intensidade de luminância por densidade de cor para cada uma das quatro amostras. A linha azul é formada pelo

resultado da medição em pixels referente à iluminação da costura ao longo do seu comprimento total e a linha vermelha é aproximação linear.

Figura 27 – Intensidade de luminância em pixels da amostra de reta A (a), reta B (b), reta C (c), e reta D (d)



Fonte: elaborado pelo autor

Verifica-se que, para cada gráfico apresentado na Figura 27, a intensidade de luminância diminui ao longo da costura, o que era de se esperar, visto que vai se distanciando da fonte emissora de luz. Um comportamento semelhante também foi visto nos estudos de Yang, Cho e Lee (2018).

Na Figura 28 foram plotados os resultados do ponto inicial da intensidade de luminância. Estes resultados foram gerados pelo *software* para as quatro amostras de costuras em forma de reta. A partir da análise deste gráfico, pode-se concluir que todas as amostras tiveram resultados similares e que, portanto, o processo de costura bem como a presença de danos mecânicos (pequenas rachaduras) ao longo da extensão da POF, apresentaram resultados semelhantes, constatando-se uma certa estabilidade entre o comportamento das amostras.

Figura 28 – Análise da intensidade de luminância em pixels das retas

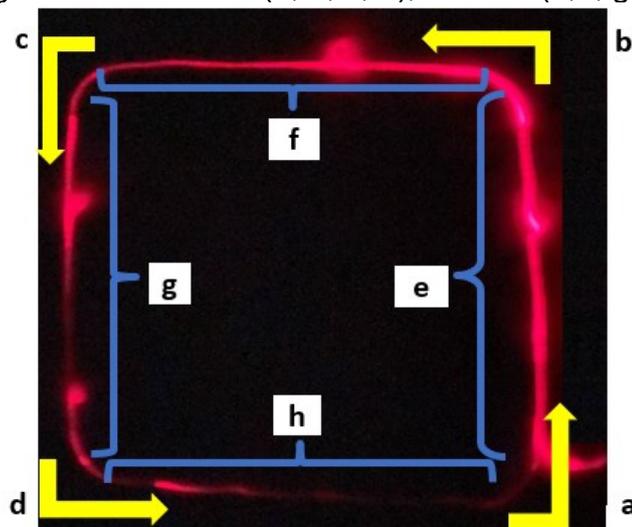


Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.1.1.2 Avaliação da intensidade de luminância nas costuras em forma de retângulos

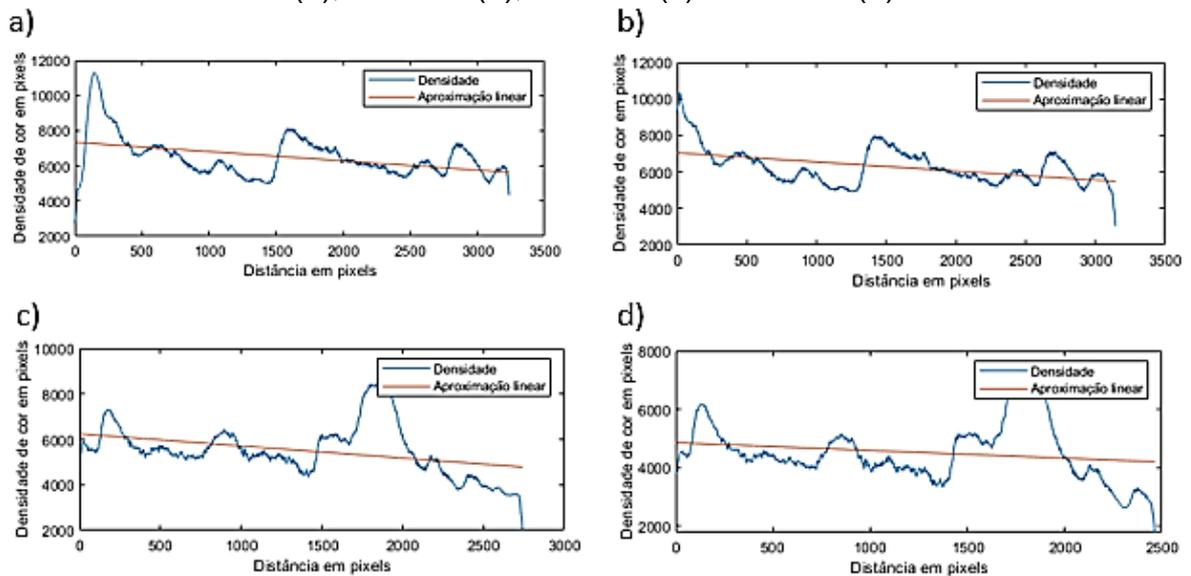
A Figura 29 ilustra os vértices (a, b, c, d) e também as arestas (e, f, g, h) da costura retangular (ao ser submetida ao ensaio de transmissibilidade de luz). Na Figura 30 nota-se que a cada vértice do retângulo (ponto de encontro entre duas arestas) ocorreu uma maior queda na intensidade de luminância, apresentando, portanto, alguma dificuldade na transmissibilidade de luz. Os gráficos gerados pelo *software* para cada uma das quatro arestas que formam o retângulo da amostra A, apresentam queda à medida que cada ponto vai se distanciando da fonte emissora de luz.

Figura 29 – Vértices (a, b, c, d), arestas (e, f, g, h)



Fonte: elaborado pelo autor

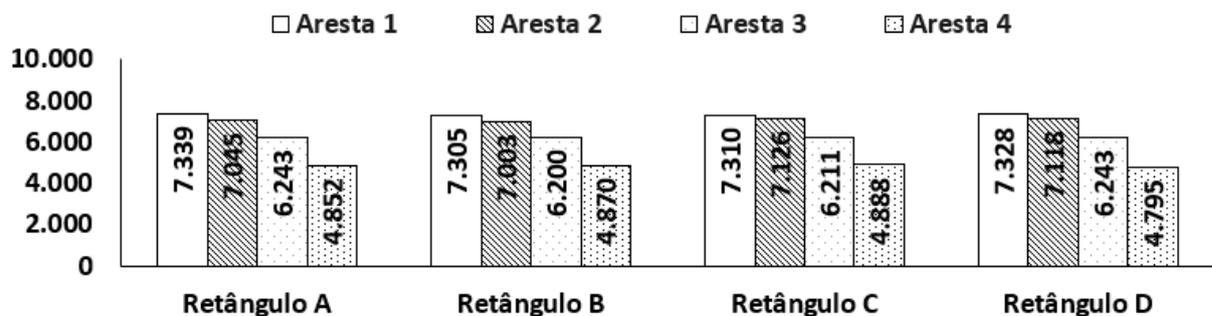
Figura 30 – Intensidade de luminância em pixels da amostra de retângulo A: aresta 1 (a), aresta 2 (b), aresta 3 (c) e aresta 4 (d)



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 31 foram plotados os resultados de intensidade de luminância para cada uma das amostras retangulares e também para cada uma das suas quatro arestas. É possível verificar um comportamento similar em todas as amostras retangulares: aresta 1 tem um resultado maior de transmissibilidade de luz e as demais seguem apresentando um resultado decrescente, ou seja, quanto maior a distância da fonte emissora de luz, maior a queda na intensidade de luminância. Entretanto, é importante salientar, que apesar da queda, houve transmissibilidade de luz até completar um ciclo de cada uma das amostras retangulares.

Figura 31 – Análise da intensidade de luminância em pixels das arestas de cada retângulo



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 3 apresenta, em dados percentuais, a queda da aresta 2 para a 1, da aresta 3 para a 2, e por fim da aresta 4 para a 3.

Tabela 3 – Percentual de queda na intensidade de luminância dos retângulos

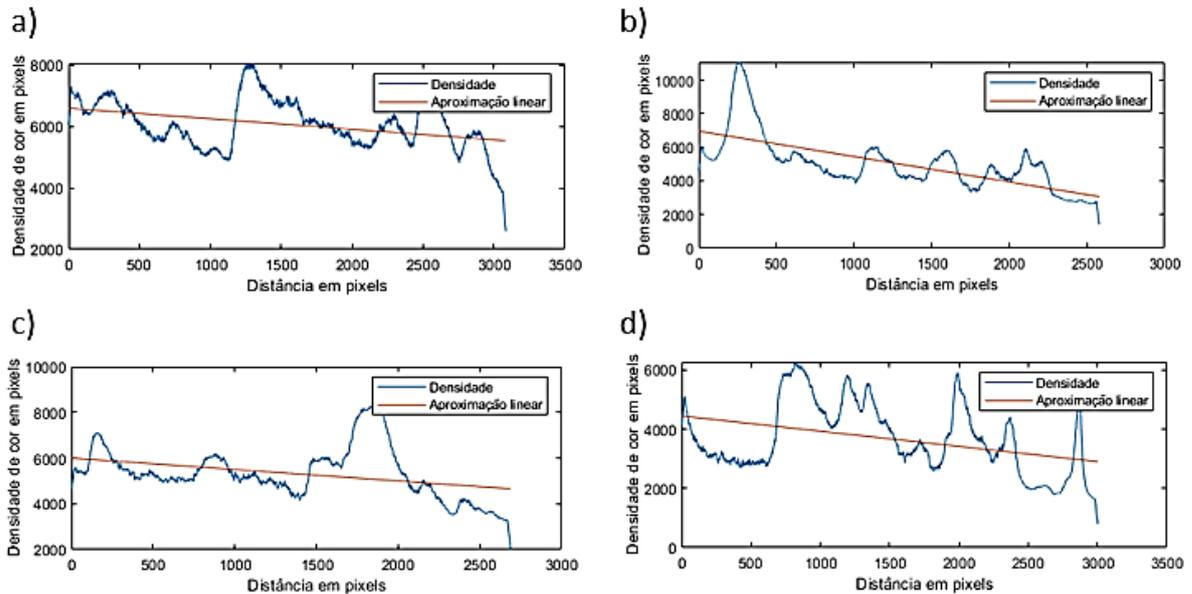
<b>Amostra</b>	<b>Queda da aresta 2 em relação à aresta 1</b>	<b>Queda da aresta 3 em relação à aresta 2</b>	<b>Queda da aresta 4 em relação à aresta 3</b>
Retângulo A	- 4,0 %	- 11,4 %	-22,3 %
Retângulo B	- 4,1 %	- 11,5 %	- 21,5 %
Retângulo C	- 2,5 %	- 12,8 %	- 21,3 %
Retângulo D	- 2,9 %	- 12,3 %	- 23,2 %
<b>Média</b>	<b>- 3,4 %</b>	<b>- 12,0 %</b>	<b>- 22,1 %</b>

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.1.1.3 Avaliação da intensidade de luminância nas costuras em forma de circunferência

Ao analisar os gráficos gerados pelo *software* para cada costura na forma de circunferência, também se observa uma queda à medida que cada ponto vai se distanciando da fonte emissora de luz. Além disso, verifica-se também a formação de picos durante a análise (mais vazamentos de luz), quando comparadas as outras amostras com costuras reta e na forma retangular, indicando que a costura do tipo circunferência acaba danificando mais a POF. A Figura 32 ilustra a intensidade de luminância para a costura em forma de circunferência da amostra A e cada um dos gráficos ilustra a leitura de intensidade de uma parte da circunferência até completar um ciclo.

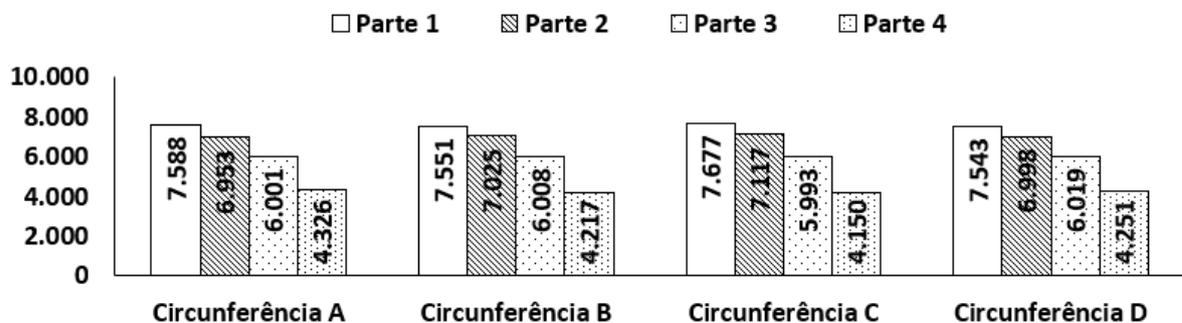
Figura 32 – Intensidade de luminância em pixels da amostra de circunferência A: parte 1 (a), parte 2 (b), parte 3 (c), e parte 4 (d)



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 33 foram plotados todos os resultados de intensidade de luminância para cada uma das quatro amostras com costura na forma de circunferência e para cada uma das suas quatro partes. É possível concluir que todas as amostras tiveram resultados similares e decrescentes à medida que vão se distanciando da fonte emissora de luz. Outro resultado importante é que apesar da queda, houve transmissibilidade de luz até o final, ou seja, até completar o ciclo de cada uma das amostras de circunferência.

Figura 33 – Análise da intensidade de luminância em pixels de cada parte das circunferências



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 4 apresenta em dados percentuais a queda da parte 2 para a 1, a queda da parte 3 para a 2 e assim consecutivamente. Comparando as Tabelas 3 e 4, é possível constatar que as amostras de circunferência apresentaram maior percentual de queda do que as amostras retangulares. Isto pode ser justificado pela própria costura em si, que força a POF constantemente a adquirir a forma desejada, devido a curvatura, diferente do que ocorre em um retângulo, onde a curvatura ocorre somente nos vértices.

Tabela 4 – Percentual de queda na intensidade de luminância das circunferências

<b>Amostra</b>	<b>Queda da parte 2 em relação à parte 1</b>	<b>Queda da parte 3 em relação à parte 2</b>	<b>Queda da parte 4 em relação à parte 3</b>
Circunferência A	- 8,4 %	- 13,7 %	- 26,0 %
Circunferência B	- 7,0 %	- 14,5 %	- 29,8 %
Circunferência C	- 7,3 %	- 15,8 %	- 24,9 %
Circunferência D	- 7,2 %	- 14,0 %	- 29,4 %
<b>Média</b>	<b>- 7,5 %</b>	<b>- 14,5 %</b>	<b>- 27,5 %</b>

Fonte: elaborado pelo autor

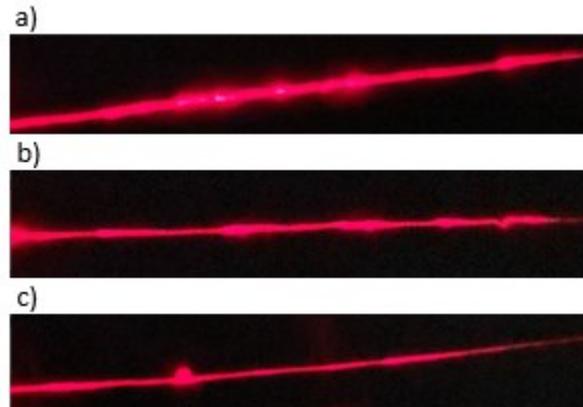
## 4.2 LAVAGEM E SECAGEM

Nos ensaios de lavagem e secagem, buscou-se avaliar o comportamento da costura de POF antes e após este processo para as quatro amostras de costuras em forma de reta e também para uma amostra em forma de retângulo. Referente aos resultados qualitativos estes foram positivos, pois as costuras com POF permaneceram inalteradas visualmente mesmo em contato com água, atrito (processo de lavagem) e calor (processo de secagem).

### 4.2.1 Avaliação da intensidade de luminância após lavagem e secagem nas costuras em forma de reta

A Figura 34 apresenta os resultados do ensaio de transmissibilidade de luz para uma das quatro amostras de reta antes de lavar, após 1 lavagem e secagem e após 2 lavagens e secagens. Ao observar as imagens, não são percebidas grandes variações.

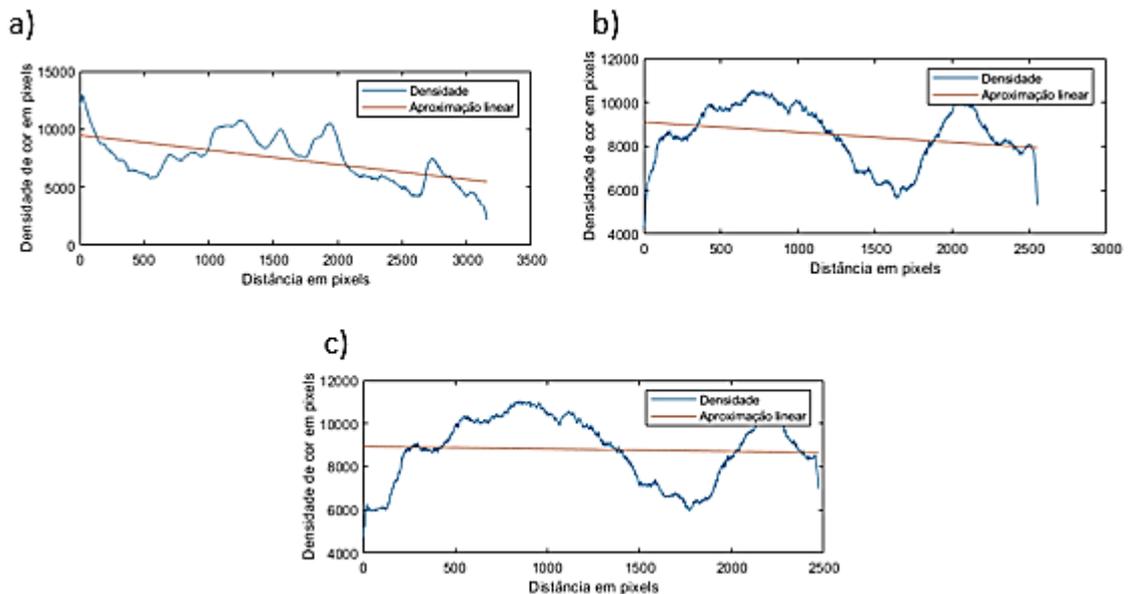
Figura 34 – Transmissibilidade de luz na amostra de reta A: antes de lavar (a), 1 lavagem e secagem (b) e 2 lavagens e secagens (c)



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 35 apresenta a leitura da intensidade de luminância das imagens apresentadas anteriormente. Nota-se que à medida que se aumenta a quantidade de lavagens e secagens ocorre uma queda não acentuada na intensidade de luminância.

Figura 35 – Intensidade de luminância de cor em pixels da amostra de reta A: antes de lavar (a), 1 lavagem e secagem (b), e 2 lavagens e secagens (c)

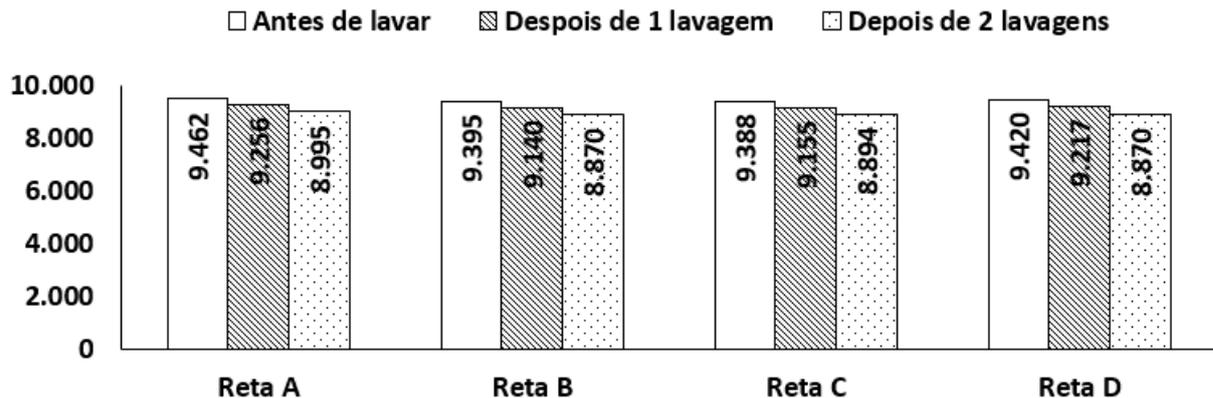


Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 36 apresenta uma análise referente às leituras de intensidade de luminância das quatro amostras de costura reta (A, B, C e D), na seguinte ordem: antes de lavar, após 1 lavagem e secagem e após 2 lavagens e secagens. Observa-

se através dos resultados uma queda não tão acentuada, demonstrando que apesar da interferência do processo de lavagem e secagem sobre a intensidade de luminância, a mesma não é agressiva.

Figura 36 – Análise da intensidade de luminância em pixels das retas: antes e após o processo de lavagem e secagem



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 5 apresenta, em dados percentuais, a queda das amostras após o processo de lavagem e secagem. É possível observar um baixo percentual de queda após 1 lavagem e secagem e uma queda ligeiramente maior após 2 lavagens e secagens. O resultado pode ser explicado devido a POF de PMMA apresentar boa resistência a quebras, a produtos químicos e a elevadas temperaturas (YANG; CHO, LEE, 2018; GE, 2021). No caso do processo de lavagem, as amostras resistiram ao atrito, ao tempo e ao sabão em pó; no caso do processo de secagem as amostras resistiram a temperatura, que foi de 70° C.

Tabela 5 – Percentual de queda da intensidade de luminância após 1 e 2 lavagens e secagens

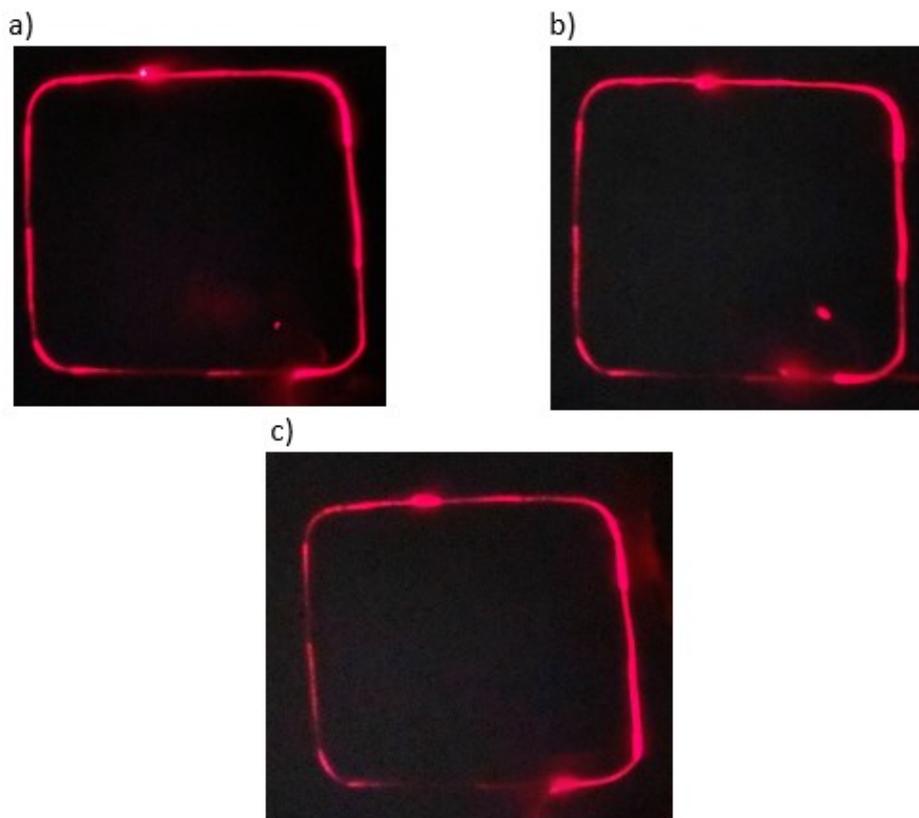
Amostra	Após 1 lavagem	Após 2 lavagens
Reta A	- 2,2 %	- 2,8 %
Reta B	- 2,7 %	- 3,0 %
Reta C	- 2,5 %	- 2,9 %
Reta D	- 2,2 %	- 3,8 %
<b>Média</b>	<b>- 2,4 %</b>	<b>- 3,1 %</b>

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.2.2 Avaliação da intensidade de luminância após lavagem e secagem nas costuras em forma de retângulo

A Figura 37 apresenta os resultados do ensaio de transmissibilidade de luz para a costura em forma de retângulo da amostra A: antes de lavar, após 1 lavagem e secagem e após 2 lavagens e secagens. Ao se realizar a análise visual das imagens não são observadas grandes variações.

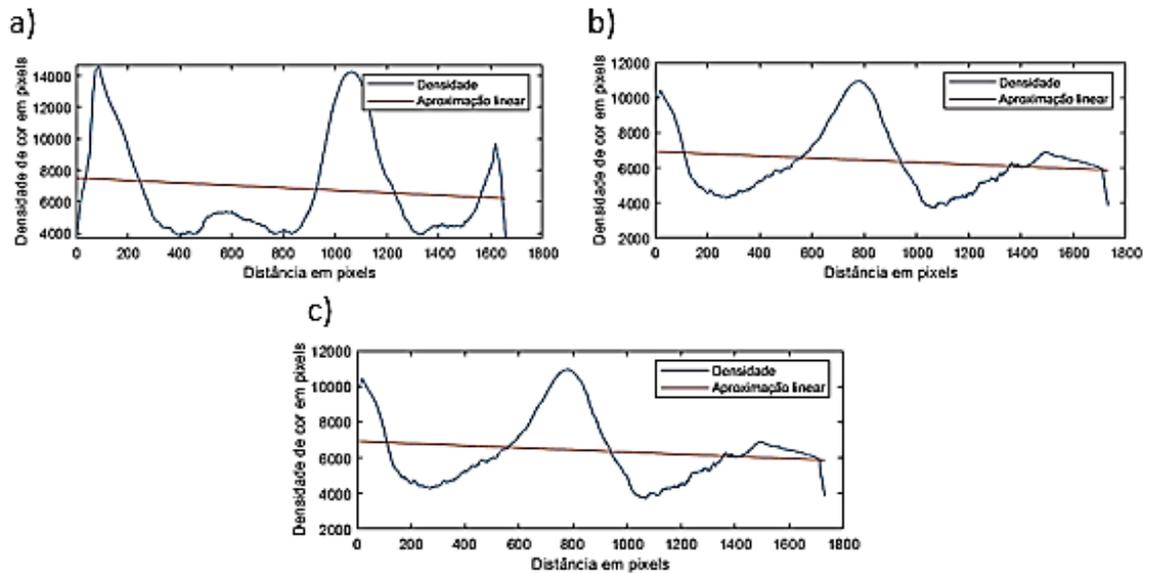
Figura 37 – Transmissibilidade de luz na amostra de retângulo A: antes de lavar (a), após 1 lavagem e secagem (b) e após 2 lavagens e secagens (c)



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 38 apresenta uma análise referente às leituras de intensidade de luminância para a aresta 1 da amostra de retângulo A, antes de lavar, após 1 lavagem e secagem e após 2 lavagens e secagens.

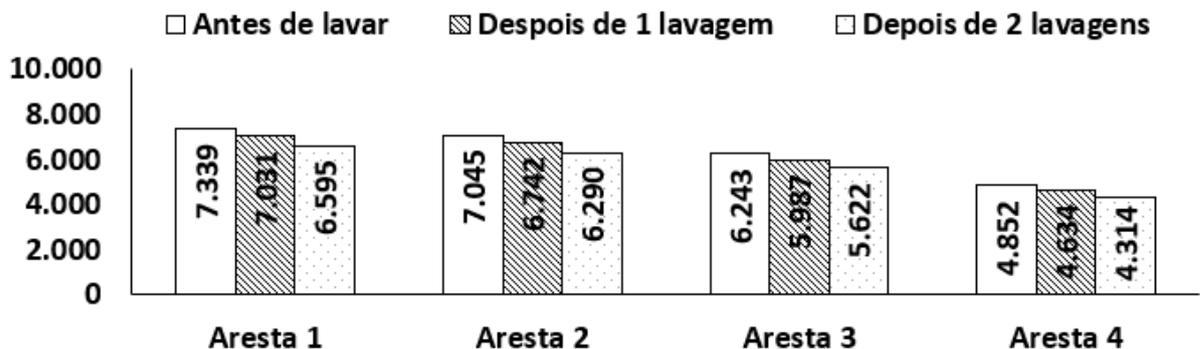
Figura 38 – Intensidade de luminância de cor em pixels da amostra de retângulo A: aresta 1 antes de lavar (a), aresta 1 após 1 lavagem e secagem (b), aresta 1 após 2 lavagens e secagens (c)



Fonte: elaborado pelo autor

Ao analisar a Figura 39, é possível constatar uma queda semelhante em todas as 4 arestas do retângulo A. A média da queda na intensidade de luminância após 1 lavagem e secagem é de 4,3 % e após 2 lavagens e secagens é de 6,5%. Quando este resultado é comparado aos resultados das amostras de costura reta, no caso da primeira lavagem e secagem a queda da costura retangular é quase o dobro e no caso da segunda lavagem e secagem a queda chega a ser duas vezes maior.

Figura 39 – Análise da intensidade de luminância em pixels de cada aresta do retângulo A: antes de lavar, após 1 lavagem e secagem, após 2 lavagens e secagens

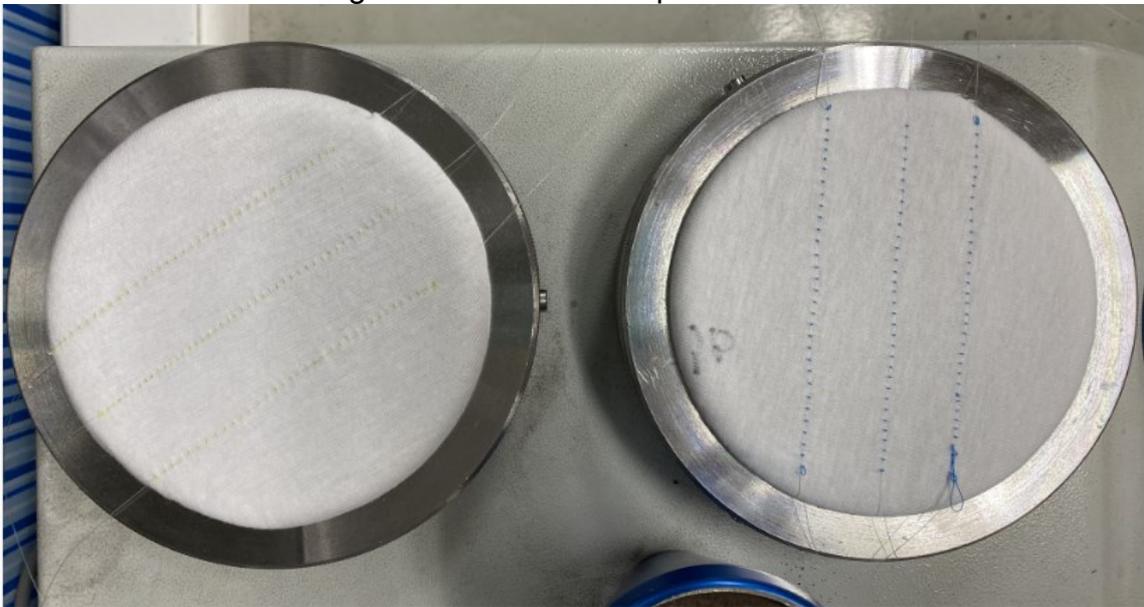


Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.3 RESISTÊNCIA À ABRASÃO (MARTINDALE)

Do total de dezoito amostras preparadas para o ensaio de Martindale, sendo seis amostras do grupo A, seis amostras do grupo B e seis amostras do grupo C, todas estas resistiram aos ensaios que foram submetidas. Não ocorreram rupturas nas costuras e as pontas das POFs (deixadas para o ensaio de transmissibilidade) não foram danificadas (Figura 40).

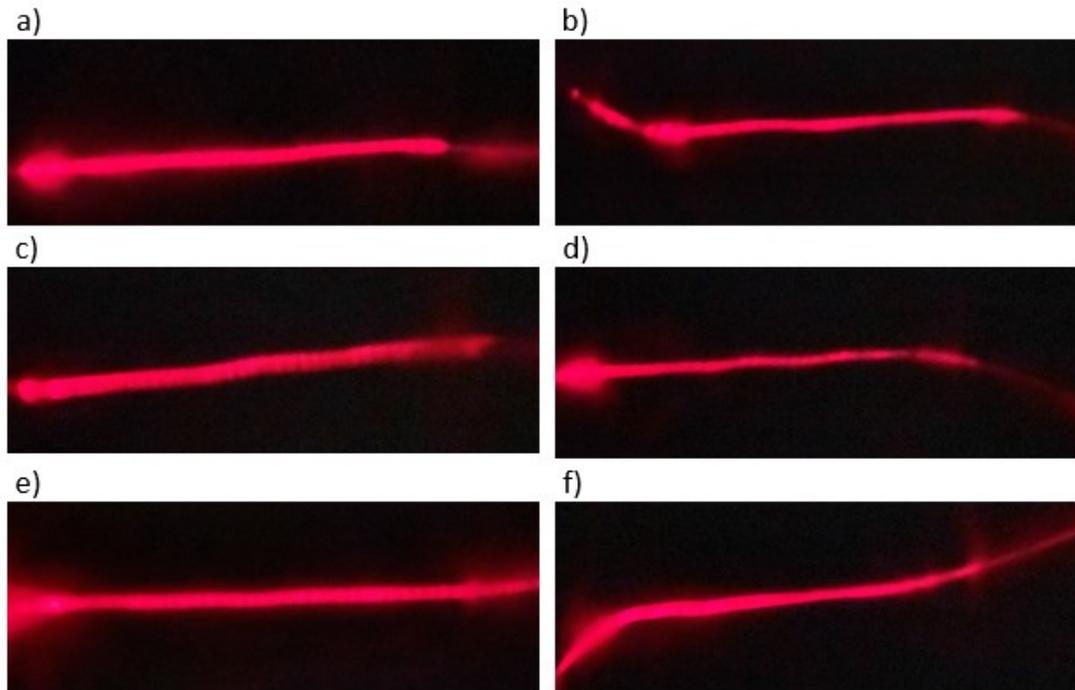
Figura 40 – Amostras após o Martindale



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 41 apresenta os resultados do ensaio de transmissibilidade de luz através de imagens das amostras antes e após o Martindale, para os três grupos de amostras (A, B e C) que foram submetidos a 125 ciclos.

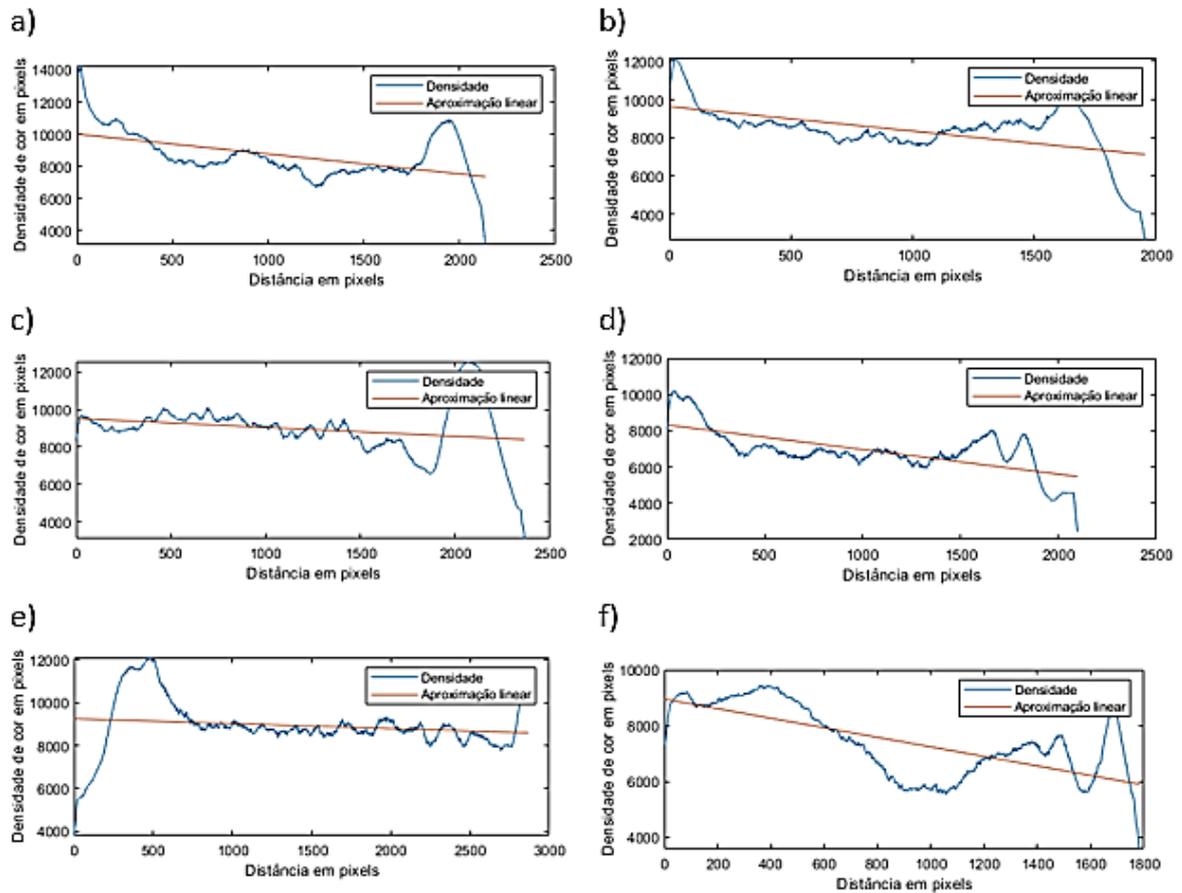
Figura 41 – Transmissibilidade de luz antes e após o Martindale (125 ciclos) de cada grupo: A antes (a) e após (b); B antes (c) e após (d); C antes (e) e após o ensaio (f)



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 42 apresenta a leitura da intensidade de luminância das imagens apresentadas anteriormente. Nota-se que para todos os casos houve uma queda na intensidade de luminância de todas as amostras após o Martindale.

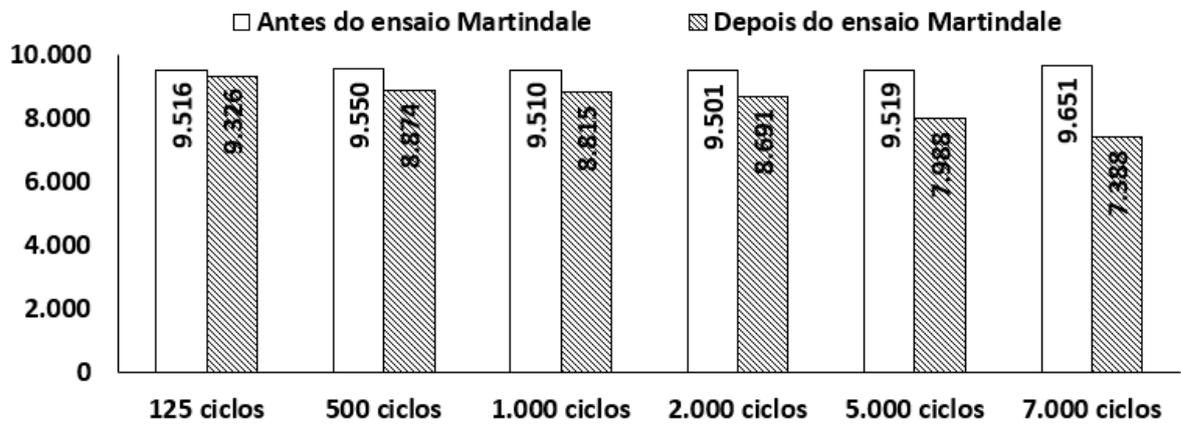
Figura 42 – Intensidade de luminância em pixels antes e após o Martindale (125 ciclos) de cada grupo: A antes (a) e após (b); B antes (c) e após (d); C antes (e) e após (f)



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 43 apresenta a média das leituras referente a intensidade de luminância de todos os três grupos de amostras submetidos aos ensaios de Martindale e para os seis ciclos determinados. Nota-se, portanto, uma queda crescente à medida que os ciclos vão aumentando.

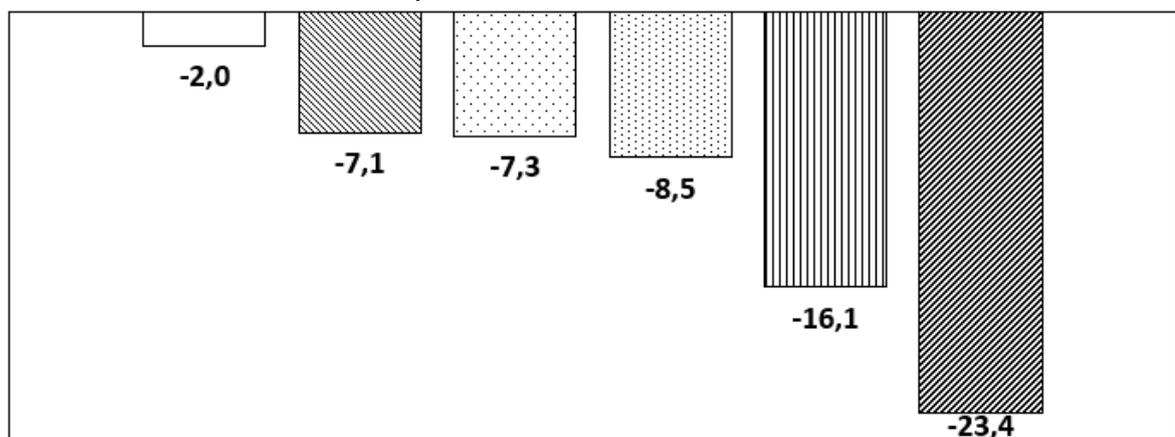
Figura 43 – Análise da intensidade de luminância em pixels antes e após o Martindale



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 44 apresenta a média percentual referente a queda na intensidade de luminância após o ensaio de Martindale. Nota-se que à medida que a quantidade de ciclos vai aumentando, o percentual de queda também aumenta.

Figura 44 – Percentual de queda da intensidade de luminância após o Martindale para seis ciclos distintos



□ 125 ciclos   ■ 500 ciclos   ■ 1.000 ciclos   ■ 2.000 ciclos   ■ 5.000 ciclos   ■ 7.000 ciclos

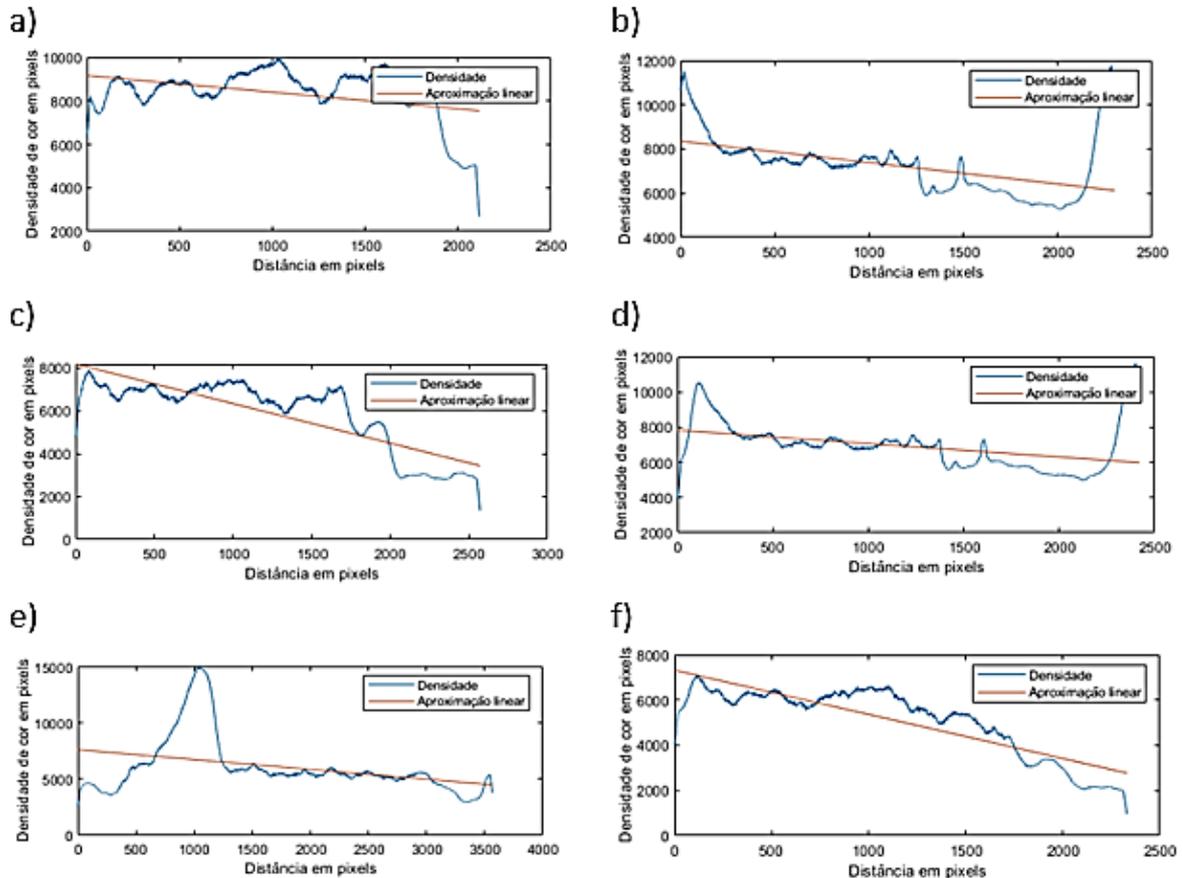
Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.3.1 Transmissibilidade de luz após Martindale, lavagens e secagens

Todas as seis amostras do grupo A, após terem sido submetidas ao ensaio de Martindale, também foram submetidas ao ensaio de 2 lavagens e secagens e logo após foi realizado o ensaio de transmissibilidade luz. A Figura 45 apresenta a leitura

da intensidade de luminância, notam-se alguns picos ao longo da linha azul dos gráficos das Figuras 45b, 45d e 45e, isso ocorreu devido a um maior vazamento de luz nestas regiões

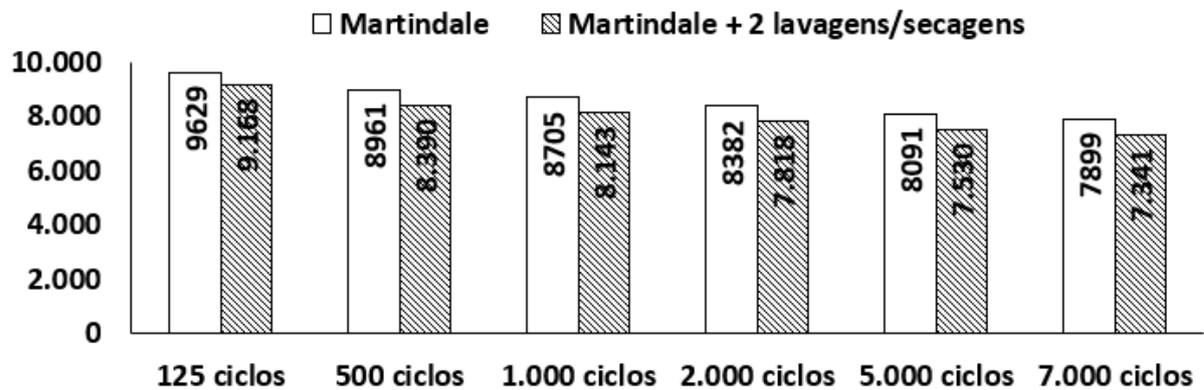
Figura 45 – Intensidade de luminância em pixels das amostras do grupo A após o ensaio de Martindale, 2 lavagens e secagens: 125 ciclos (a), 500 ciclos (b), 1.000 ciclos (c); 2.000 ciclos (d), 5.000 (e), 7.000 ciclos (f)



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 46 ilustra um comparativo das amostras do grupo A: Martindale e Martindale mais 2 lavagens e secagens. Para cada um dos seis tipos de ciclos diferentes, nota-se que uma queda na intensidade de luminância de todas as amostras após estas terem sido submetidas aos ensaios de lavagens e secagens.

Figura 46 – Análise da intensidade de luminância em pixels: Martindale e Martindale + 2 lavagens e secagens (amostras do grupo A)



Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 6 apresenta, em dados percentuais, a queda na intensidade de luminância para o caso apresentado anteriormente. É possível observar uma média de queda de 6,4 %. Isso se explica, pois, quanto maior o atrito, também maior o desgaste da costura de POF e, portanto, maior a queda na intensidade de luminância, pois acordo com Chen *et al.* (2020) os danos críticos causados às POFs, também podem gerar implicações na passagem de luz.

Tabela 6 – Percentual de queda da intensidade de luminância após ensaio de Martindale + 2 lavagens e secagens (grupo A)

Amostra	Após 2 lavagens e secagens
125 ciclos	- 4,8 %
500 ciclos	- 6,4 %
1.000 ciclos	- 6,5 %
2.000 ciclos	- 6,7 %
5.000 ciclos	- 6,9 %
7.000 ciclos	- 7,1 %
<b>Média</b>	<b>- 6,4 %</b>

Fonte: elaborado pelo autor

#### 4.4 RESISTÊNCIA À ABRASÃO (PILLING BOX)

Do total de oito amostras preparadas para o ensaio de Pilling box, somente duas destas resistiram ao ensaio (Figura 47), diferente do que ocorreu com as outras seis amostras que tiveram tanto as costuras como as pontas das POF danificadas (quebradas), devido ao atrito gerado pelo ensaio que teve duração de 6 horas.

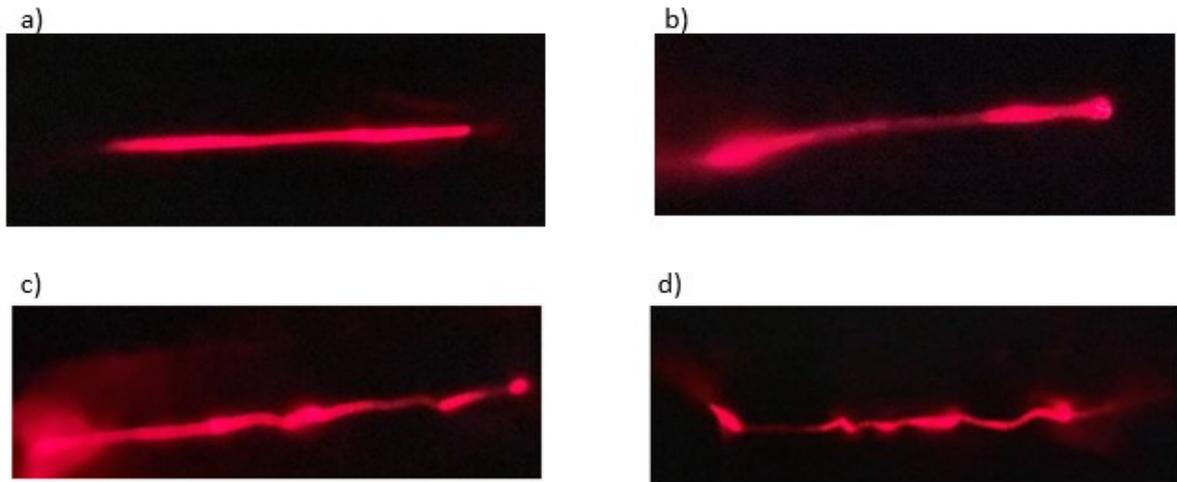
Figura 47 – Amostras após o ensaio de Pilling box



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 48 apresenta os resultados do ensaio de transmissibilidade de luz para as duas amostras que resistiram ao ensaio do Pilling box até o final. A Figura 48a apresenta a imagem da amostra antes do ensaio de Pilling box (costura na direção da coluna) e a Figura 48b representa a mesma amostra, porém após o ensaio. O mesmo ocorre para a Figura 48c e Figura 48d, mas agora na direção do curso.

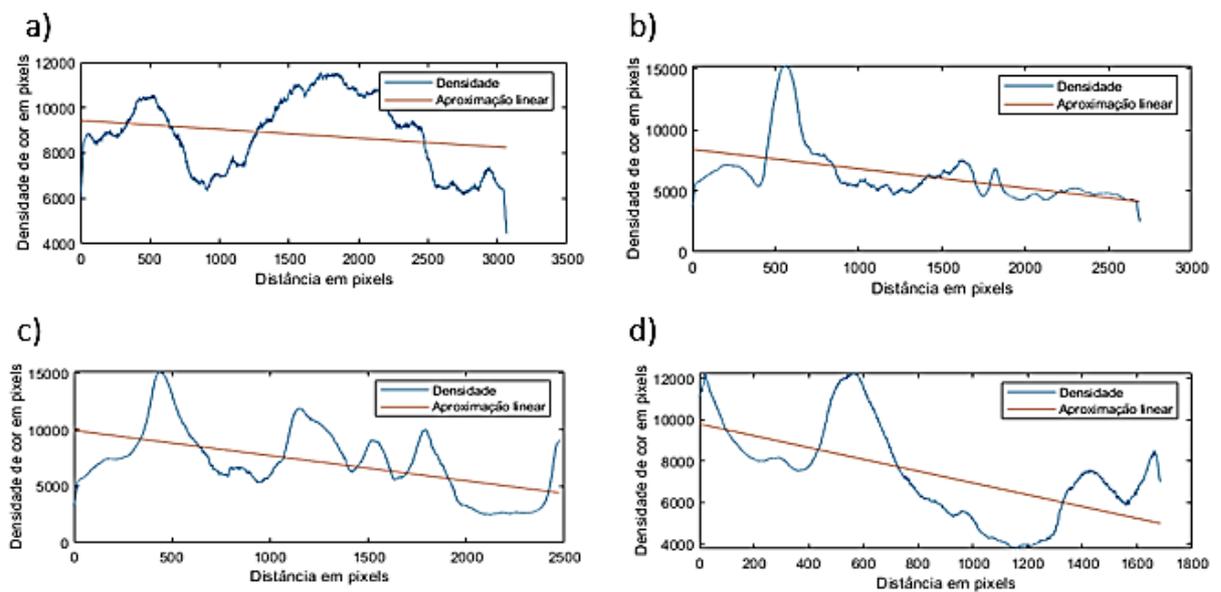
Figura 48 – Transmissibilidade de luz na da costura em forma de reta: na direção da coluna antes (a) e após o ensaio de Pilling box (b); na direção do curso antes (c) e após o ensaio (d)



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 49 apresenta a leitura da intensidade de luminância das imagens apresentadas anteriormente. Nota-se que para ambos os casos houve uma queda na intensidade.

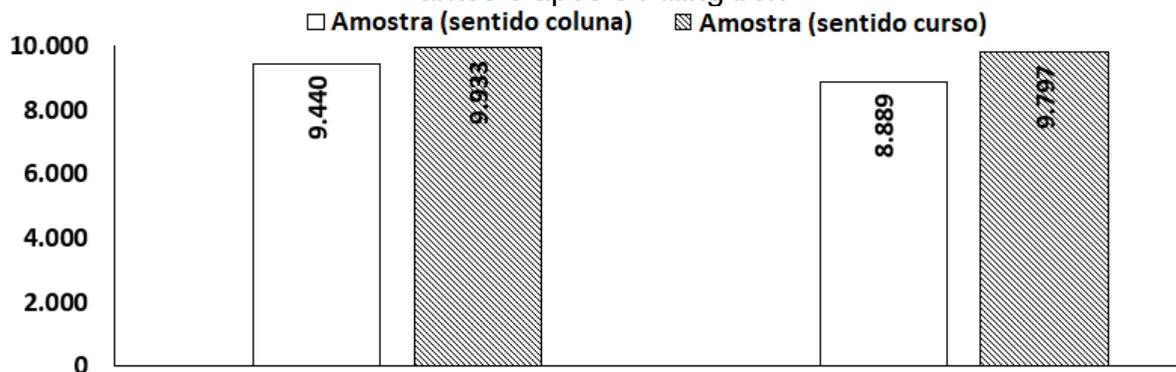
Figura 49 – Intensidade de luminância em pixels da costura em forma de reta: na direção da coluna antes (a) e após o ensaio de Pilling box (b); na direção do curso antes (c) e após (d)



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 50 apresenta uma análise referente às leituras de intensidade de luminância por densidade de cor em pixels das imagens apresentadas anteriormente na Figura 49. Nota-se, portanto, uma queda de 5,8 % na amostra (direção da coluna) e 1,4 % na amostra (direção do curso). Num total de oito amostras, com três costuras cada, logo pode-se dizer que de vinte e quatro costuras, apenas duas costuras (de amostras distintas), resistiram até o final do ensaio. Sendo assim é possível constatar que vinte e duas costuras, ou seja 91,7% não apresentaram boa resistência. O ensaio de Pilling box demonstrou ser mais agressivo para as POFs costuradas. De acordo com Yang, Cho e Lee (2018) e Ge (2021) as POFs apresentam boa resistência à ruptura. Entretanto foi possível observar esta propriedade através dos ensaios de resistência à abrasão pelo método Martindale, onde o tempo das amostras expostas ao ensaio é menor que o tempo das amostras expostas ao ensaio de Pilling box.

Figura 50 – Análise da intensidade de luminância em pixels das amostras antes e após o Pilling box



Fonte: elaborado pelo autor

Chega-se ao fim da apresentação dos resultados de todos os ensaios que fizeram parte da caracterização das POF a partir da sua introdução através da técnica de costura para desenvolvimento de têxteis inteligentes. De modo geral todas as amostras apresentaram comportamento de queda na intensidade de luminância, comparando o antes e após os ensaios. Entretanto a funcionalidade de luminescência continuou presente no têxtil, através da costura de POF, mesmo após os ensaios. Além de que também pôde-se observar na costura, propriedades importantes para a qualidade de um produto final, mencionadas por Colovic (2015), tais como: resistência, durabilidade, segurança e aparência.

## 5 CONCLUSÕES

Pode-se constatar que as OFs possuem um papel significativo no que tange ao potencial de desenvolvimento de têxteis inteligentes. Tratando-se especificamente das POFs, foi verificado um avanço no desenvolvimento de têxteis inteligentes com capacidade luminescente, sobretudo através da inserção por meio de técnicas de tecelagem plana (neste segmento já existe produção e comercialização de produtos), malharia por trama (retilínea) e bordado.

Portanto, nesta dissertação de mestrado, POFs de PMMA de 0,025mm de diâmetro, através da sua inserção na bobina da máquina reta, foram costuradas a partir de um método não verificado na literatura. Após concluída esta etapa, as amostras de costuras foram caracterizadas usando como base os ensaios de lavagem e secagem, resistência à abrasão pelos métodos de Martindale e Pilling box. Ao final, foi realizada a aferição da intensidade de luminância das amostras através de um software desenvolvido especificamente para as necessidades deste trabalho.

Referente aos ensaios de costurabilidade, a POF quando inserida na bobina da máquina reta se demonstrou promissora em relação ao tipo de ponto 301 (classe 300), no que se refere à qualidade (uniformidade e aspecto visual) e a formação de costuras em formas geométricas. Com relação aos ensaios de caracterização de lavagem e secagem, os resultados foram excelentes, uma vez que as costuras de POFs apresentaram boa resistência durante o processo, apesar da queda na intensidade de luminância (ensaio de transmissibilidade de luz). Ainda se tratando do processo de caracterização, os ensaios de resistência à abrasão pelo método Martindale apresentaram bons resultados, comprovando que de 125 a 7.000 ciclos com duração de 3 min a 168 min, respectivamente, não ocorreram rupturas nas POFs. Na avaliação da transmissibilidade de luz e intensidade de luminância foi constatada uma queda de 2,0 % para o caso das amostras de 125 ciclos e 23,4 % no caso de 7.000 ciclos. Já se tratando do ensaio de resistência à abrasão pelo método de Pilling box pode-se constatar que 91,6 % das amostras não resistiram ao processo. Também foram realizados ensaios de lavagem e secagem após um grupo de amostras terem sido submetidas ao ensaio de resistência de abrasão pelo método Martindale e

verificou-se queda na intensidade de luminância, semelhante aos demais ensaios de lavagem e secagem.

Ao final da presente dissertação, além de ser possível constatar a capacidade de costurabilidade das POFs, as técnicas de caracterização estudadas se demonstram consolidadas, uma vez que se atestou a capacidade de transmissibilidade de luz e análise de intensidade de luminância após cada um dos ensaios que fizeram parte da caracterização. Isto é muito importante, uma vez que possibilita o desenvolvimento de produtos têxteis a partir de POFs com comportamento inteligente a partir da técnica de costura e a usabilidade do produto em diversas situações, sem comprometer o seu desempenho.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros no que se refere a utilização de OFs e POFs junto aos têxteis e máquinas de costura:

- a) testar o uso de OFs em sensores (para monitoramento de parâmetros fisiológicos) através de aplicação de POFs em máquinas de costura;
- b) analisar outros tipos de POFs, com diâmetros mais reduzidos e de outros materiais, buscando explorar outros tipos de pontos de costura dentro das mais variadas classes existentes;
- c) testar costurabilidade da POF em tecido plano.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9397: Materiais têxteis – Tipos de costura – Classificação. 1986. Disponível em: <https://www.abntcolecao.com.br/>. Acesso em: 23 set. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13096: Materiais têxteis – Pontos de costura – Terminologia. 1994. Disponível em: <https://www.abntcolecao.com.br/>. Acesso em: 19 set. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13483: Materiais têxteis – Tipos de pontos. 1995. Disponível em: <https://www.abntcolecao.com.br/>. Acesso em: 19 set. 2022.

ALEMDAR, Kubra et al. A novel periodic macrobending hetero-core fiber optic sensor embedded in textiles. In: 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE, 2013. p. 467-471.

ARAÚJO, Mário. Tecnologia do vestuário. 1996.

BARRIAS, António; CASAS, Joan R.; VILLALBA, Sergi. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors*, v. 16, n. 5, p. 748, 2016.

BREMER, Kort et al. Structural health monitoring using textile reinforcement structures with integrated optical fiber sensors. *Sensors*, v. 17, n. 2, p. 345, 2017.

CHEN, Amy et al. The design and development of an illuminated polymeric optical fibre (POF) knitted garment. *The Journal of The Textile Institute*, v. 111, n. 5, p. 745-755, 2020.

COLOVIC, G. Sewing, stitches and seams. In: *Garment Manufacturing Technology*. Woodhead Publishing, 2015. p. 247-273.

DECUSATIS, Casimer (Ed.). *Handbook of fiber optic data communication: a practical guide to optical networking*. Academic Press, 2013.

EOM, Jimi; LEE, Woobin; KIM, Yong-Hoon. Textile-based wearable sensors using metal-nanowire embedded conductive fibers. In: 2016 IEEE SENSORS. IEEE, 2016. p. 1-3.

FERREIRA, Alexandre José Sousa; NUNES FERREIRA, Fernando Batista; OLIVEIRA, Fernando Ribeiro. *Têxteis Inteligentes—Uma breve revisão da literatura*. 2014.

GE, Lan. Novel woven structure design for polymeric optical fiber (POF) textiles. 2021.

GONG, Zidan et al. Wearable fiber optic technology based on smart textile: A review. *Materials*, v. 12, n. 20, p. 3311, 2019.

HARLIN, Ali; MAKINEN, M.; VUORIVIRTA, Anne. Development of polymeric optical fibre fabrics as illumination elements and textile displays. *Autex Res. J.*, v. 3, n. 1, p. 8, 2003.

HARNETT, Cindy K.; ZHAO, Huichan; SHEPHERD, Robert F. Stretchable optical fibers: Threads for strain-sensitive textiles. *Advanced Materials Technologies*, v. 2, n. 9, p. 1700087, 2017.

HAROGLU, Derya; POWELL, Nancy; SEYAM, Abdel-Fattah M. A textile-based optical fiber sensor design for automotive seat occupancy sensing. *The Journal of The Textile Institute*, v. 108, n. 1, p. 49-57, 2017.

HUI, Rongqing. *Introduction to fiber-optic communications*. Academic Press, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6330 (2012): *Textiles – Domestic washing and drying procedures for textile testing*. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12945-1 (2000): *Textiles – Determination of fabric propensity to surface fuzzing and to pilling – Part 1: Pilling box method*. 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12945-2 (2000): *Textiles – Determination of fabric propensity to surface fuzzing and to pilling – Part 2: Modified Martindale method*. 2000.

ISSATAYEVA, Aizhan et al. Design of a temperature-sensing smart textile based on Fiber Bragg Grating sensor in CYTOP fiber. In: *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. IEEE, 2019. p. 1-3.

ISSATAYEVA, Aizhan et al. Fiber-optic based wearables for the continuous monitoring of respiratory rate. In: *Biophotonics in Exercise Science, Sports Medicine, Health Monitoring Technologies, and Wearables II*. SPIE, 2021. p. 1163805.

JANA, P. Sewing equipment and work aids. In: *Garment Manufacturing Technology*. Woodhead Publishing, 2015. p. 275-315.

KOIKE, Yasuhiro. *Fundamentals of plastic optical fibers*. John Wiley & Sons, 2015.

KOYAMA, Yuya; NISHIYAMA, Michiko; WATANABE, Kazuhiro. Smart textile using hetero-core optical fiber for heartbeat and respiration monitoring. *IEEE Sensors Journal*, v. 18, n. 15, p. 6175-6180, 2018.

LEAL-JUNIOR, Arnaldo G. et al. Polymer optical fiber sensors in healthcare applications: A comprehensive review. *Sensors*, v. 19, n. 14, p. 3156, 2019.

LOU, Lihua; YU, Weijie; RAMKUMAR, Seshadri. Wearable and smart responsive textiles. *High Performance Technical Textiles*, p. 439-473, 2019.

MAHMOUD, EL-SHERIF. Smart fabrics: integrating fiber optic sensors and information networks. *Wearable EHealth Systems for Personalised Health Management: State of the Art and Future Challenges*, v. 108, p. 317, 2004.

MARTENS, Y.; WEHLAGE, D.; EHRMANN, A. *Knitting with optical fibers*, 2016.

MERATI, Ali Akbar. Application of stimuli-sensitive materials in smart textiles. *Advanced Textile Engineering Materials*, p. 1-29, 2018.

MEYER, M. Como foi inventada a fibra ótica. OFICINA DA NET. Disponível em <[https://www.oficinadanet.com.br/pos\\_t/14222-como-foi-inventada-a-fibra-otica](https://www.oficinadanet.com.br/pos_t/14222-como-foi-inventada-a-fibra-otica)> Acessado em 26 de outubro, 2020.

NAJAFI, Bijan et al. An optical-fiber-based smart textile (smart socks) to manage biomechanical risk factors associated with diabetic foot amputation. *Journal of diabetes science and technology*, v. 11, n. 4, p. 668-677, 2017.

OGUZ, Yesim et al. Light-emitting fabrics for photodynamic therapy. In: *Advances in Smart Medical Textiles*. Woodhead Publishing, 2016. p. 177-194.

OLIVEIRA, A. Qual a diferença entre fibra monomodo e multimodo. *Revista Segurança Eletrônica*. Disponível em <<https://revistasegurancaeletronica.com.br/qual-a-diferenca-entre-fibra-monomodo-e-multimodo/>> Acessado em 23 de fevereiro, 2021.

OSCARSSON, Linda et al. Flat knitting of a light emitting textile with optical fibres. *Autex Research Journal*, v. 9, n. 2, p. 61-65, 2009.

PEREIRA, G. J. R. Fibras óticas e WDM. Disponível em <[https://www.gta.ufrj.br/grad/08\\_1/wdm1/index.html](https://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/wdm1/index.html)> Acessado em 23 de fevereiro, 2021.

PUFF, H. Pontos de costura. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/HeribertoPuff/pontos-de-costura-do-vestuário>. Acesso em 10 de outubro, 2021.

RAMAD, e al. Using optical fibers in the design of new-born children. Clothes for the treatment of jaundice, p. 339-354, 2017.

SCHWARZ-PFEIFFER, A. et al. Smarten up garments through knitting. In: *IOP conference series: materials science and engineering*. IOP Publishing, 2016. p. 012008.

SENG, Frederick et al. Dynamic back face deformation measurement with a single optical fibre. *International Journal of Impact Engineering*, v. 150, p. 103800, 2021.

THYAGARAJAN, K. S.; GHATAK, Ajoy. Fiber optic essentials. John Wiley & Sons, 2007.

TOSI, Daniele et al. Fiber optic sensors for biomedical applications. In: Opto-mechanical fiber optic sensors. Butterworth-Heinemann, 2018. p. 301-333.

TOW, Kenny Hey et al. Exploring the use of native spider silk as an optical fiber for chemical sensing. *Journal of Lightwave Technology*, v. 36, n. 4, p. 1138-1144, 2018.

YANG, Xiufeng et al. Textile fiber optic microbend sensor used for heartbeat and respiration monitoring. *IEEE Sensors Journal*, v. 15, n. 2, p. 757-761, 2014.

YANG, Jin-Hee; CHO, Hyun-Seung; LEE, Joo Hyeon. An analysis on the luminance efficiency of the machine embroidery method applied to flexible plastic optical fiber for realization of the textile display. *Textile Research Journal*, v. 88, n. 13, p. 1466-1478, 2018.

WOYESSA, Getinet et al. Single mode step-index polymer optical fiber for humidity insensitive high temperature fiber Bragg grating sensors. *Optics Express*, v. 24, n. 2, p. 1253-1260, 2016.

ZHAO, Yong et al. Review on the graphene based optical fiber chemical and biological sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 231, p. 324-340, 2016.