

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá**

RAFAELA CILENE SOUZA BARRETO

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS VIABILIDADES TÉCNICA E AMBIENTAL DE
FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO DE ORIGEM FÓSSIL E RENOVÁVEL**

Guaratinguetá - SP
2024



RAFAELA CILENE SOUZA BARRETO

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS VIABILIDADES TÉCNICA E AMBIENTAL DE
FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO DE ORIGEM FÓSSIL E RENOVÁVEL**

Defesa apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia em Materiais.

Orientador(a): Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Coorientador(a): Dr^a. Mirian Paula dos Santos

B273a Barreto, Rafaela Cilene Souza
Análise comparativa das viabilidades técnica e ambiental de fibras ópticas de plástico de origem fóssil e renovável / Rafaela Cilene Souza Barreto
– Guaratinguetá, 2024.
65 f. : il.
Bibliografia: f. 59-65

Dissertação – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira
Coorientador(a): Dr^a. Mirian Paula dos Santos

1. Fibras ópticas. 2. Sustentabilidade. 3. Biopolímeros.
I. Título.

CDU 621.39(043)

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Os resultados deste trabalho sugerem contribuições práticas para os sistemas de telecomunicações avançarem rumo aos ODS e à Economia Circular ao propor o uso de fibras ópticas com núcleo de origem renovável como um meio de minimizar o alto potencial de impactos ambientais negativos gerados pelo uso de fibras ópticas com núcleo de material fóssil.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The results of this work suggest practical contributions for telecommunications systems to advance towards the SDGs and the Circular Economy by proposing the use of optical fibers with a core of renewable origin as a means of minimizing the high potential for negative environmental impacts generated by the use of optical fibers with a core of fossil material.

RAFAELA CILENE SOUZA BARRETO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRA EM ENGENHARIA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA
CURSO: MESTRADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Documento assinado digitalmente

ANA PAULA ROSIFINI ALVES

Data: 30/07/2024 04:53:20-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.ª. Dr.ª. Ana Paula Rosifini Alves
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



Documento assinado digitalmente

JOSE AUGUSTO DE OLIVEIRA

Data: 18/06/2024 18:23:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ AUGUSTO DE OLIVEIRA
Orientador – UNESP



Documento assinado digitalmente

MARCIA REGINA DE MOURA AOUADA

Data: 20/06/2024 08:30:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.ª. Dr.ª. MARCIA REGINA DE MOURA AOUADA
UNESP



Documento assinado digitalmente

IVAN ARITZ ALDAYA GARDE

Data: 18/06/2024 18:33:42-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. IVAN ARITZ ALDAYA GARDE
UNESP

MAIO de 2024

DADOS CURRICULARES

RAFAELA CILENE SOUZA BARRETO

NASCIMENTO 26/09/1997 – Ilha Solteira / SP

FILIAÇÃO Rui Carlos Valentim Barreto Junior
Cilene Souza da Silva

2017/2021 Bacharel em Engenharia Química
AEMS – Faculdades Integradas de Três Lagoas

Dedico este trabalho à minha Tia Iza, que em todos os momentos esteve comigo, como amiga e conselheira. Obrigada!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e imensamente, agradeço a Deus, por me capacitar e me sustentar em cada passo deste processo. Todas as lutas e todas as dificuldades se fizeram pequenas diante da força que Ele me deu.

A minha mãe Cilene Souza, agradeço por me dar a vida e fazer dela a melhor possível diante de todas as nossas dificuldades e adversidades. Por cada palavra em cada momento difícil, eu agradeço.

Agradeço aos meus avós Lino e Nelmizia, que em todos os momentos possíveis estiveram presentes para me ajudar, muito mais do que eu pudesse imaginar, sendo colo, carinho, amparo e força, para que eu enxergasse que o longo caminho que já percorri não poderia ser parado antes de finalizar a corrida.

A minha tia Iza, que foi minha casa, meu abrigo e minha força diária, com seus conselhos e companhia durante cada dia de dificuldade. Me cedeu muito mais do que um lugar para morar, me cedeu seu amor, seu colo e toda a sua dedicação para que eu pudesse conquistar mais uma etapa da minha vida da melhor forma possível sem desistir.

Ao meu namorado Eli Carlos, que foi meu alicerce e minha força durante todos os dias, me incentivando e encorajando a nunca desistir. Abriu meus olhos para as melhores coisas da vida e, principalmente me ensinou a colocar como prioridade tudo o que eu faço para crescer e alcançar meus objetivos. Foi a minha calma em todos os dias turbulentos, dedico a ele todo meu orgulho e admiração, que foram essenciais para continuar meu caminho.

Para o meu querido amigo Alex Matheus, dedico um parágrafo especial, por me acompanhar em todas as etapas e estar comigo em todo os dias de choro dentro dos laboratórios, me mostrando que sou capaz de conquistar mais esta etapa. Ele é meu maior exemplo de força e superação.

Aos meus amigos e primos mais chegados que irmãos, Maria Eduarda, Gabriela, Amanda, Julia, Isabela e Mateus, por terem sempre uma palavra quando precisei desabafar e ouvir. Obrigada por cada sorriso no meio de tudo.

Um agradecimento especial para a professora Márcia e para o professor Fauze pela disponibilidade e acessibilidade, que foram de suma importância para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da FEG-UNESP, pelo apoio e incentivo para que o presente trabalho fosse realizado da melhor forma possível dentro do que estava disponível e a seu alcance.

Por fim, e não menos importante, agradeço imensamente ao meu orientador José Augusto e a minha coorientadora Mirian Paula por serem muito mais do que orientadores, por serem amigos e compreendedores em todas as situações que precisei enfrentar. Obrigada, de coração por sempre se fazerem presentes.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - número do processo 2020/11874-5.

“Mas eu mesmo, eu sou tudo isso aí.
Em construção e capenga, mas o tanto que cai,
levanta.”

- Criolo

RESUMO

O setor de telecomunicações e toda a infraestrutura capacitada por fibras ópticas têm ampliado sua presença global, acompanhando a rápida evolução da demanda da sociedade por informações e tecnologia. Enquanto as Fibras Ópticas de Vidro, do inglês, *Glass Optical Fiber* (GOF) são comumente utilizadas para propagar sinais a altas taxas e a longas distâncias, as Fibras Ópticas Plásticas, do inglês, *Polymer Optical Fiber* (POF) podem ser uma vantajosa alternativa em comunicações a curtas distâncias, no entanto, sua fabricação tem sido realizada a partir de fontes fósseis, o que acarreta alto potencial de impactos ambientais negativos ao longo do seu ciclo de vida. Uma oportunidade para a superação desta adversidade é a utilização de biopolímeros de fontes renováveis. O poli(*metacrilato de metila*) (PMMA) é altamente utilizado na fabricação de POFs, devido a sua alta transparência, durabilidade e relação custo-benefício. Para que o PMMA de origem renovável possa substituir o PMMA de origem fóssil, o mesmo deve apresentar uma transparência compatível ao PMMA de origem fóssil. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho ambiental entre dois tipos de fibras ópticas, sendo uma constituída por um núcleo de PMMA de origem fóssil e outra por um núcleo de PMMA de origem renovável, e se possível, avaliar o seu desempenho tecnológico. As avaliações iniciaram com o processo de caracterização de duas amostras de materiais fósseis e duas amostras de materiais renováveis, destas amostras foram confeccionados filmes e pré-formas para a posterior fabricação de fibras, logo após foi realizado um teste de biodegradação, que de acordo com seu resultado, detectou-se a necessidade da realização uma análise de ângulo de contato. Os resultados da caracterização por espectroscopia vibracional no infravermelho por transformada de Fourier, do inglês *Fourier Transform Infrared* (FTIR) mostraram alta similaridade entre os materiais. A espectroscopia no ultravioleta-visível permitiu constatar que os materiais não apresentam transições eletrônicas na região de interesse (530 nm, 573 nm e 650 nm). A calorimetria exploratória diferencial para as amostras de PMMA de origem renovável revelou uma temperatura de transição vítrea menor do que a relatada na literatura, que podem estar relacionadas com a adição de plastificantes. Já a termogravimetria revelou que as amostras de origem renovável apresentam picos mais alargados do que as amostras de origem fóssil, sendo um indicativo de ocorrerem mais de uma reação de decomposição simultaneamente, porém em velocidades diferentes. Como conclusão, foi possível observar que o PMMA de fonte fóssil e renovável apresentam estruturas semelhantes, tornando assim o material um candidato com alto potencial para a substituição na construção de uma POF.

PALAVRAS-CHAVE: Caracterização; PMMA; Sustentabilidade; Fibras Ópticas Plásticas.

ABSTRACT

The telecommunications sector and the entire infrastructure enabled by optical fibers have expanded their global presence, following the rapid evolution of society's demand for information and technology. While Glass Optical Fibers (GOFs) are commonly used to propagate signals at high rates and over long distances, Plastic Optical Fibers (POFs) can be an advantageous alternative in communications over short distances, however, its manufacture has been carried out from fossil sources, which entails a high potential for negative environmental impacts throughout its life cycle. An opportunity to overcome this adversity is the use of biopolymers from renewable sources. Poly(methyl methacrylate) (PMMA) is highly used in the manufacture of POFs, due to its high transparency, durability and cost-benefit ratio. For application in optical communications, it is possible to use PMMA from renewable sources, which must have a transparency similar to that of PMMA from fossil sources. The objective of this work is to evaluate the environmental performance between two types of optical fibers, one consisting of a PMMA core of fossil origin and the other of a PMMA core of renewable origin, and if possible, evaluate their technological performance. The evaluations began with the characterization process of two samples of fossil materials and two samples of renewable materials, from these samples films and preforms were made for the subsequent manufacture of fibers, shortly after a biodegradation test was carried out, which according to As a result, the need to perform a contact angle analysis was detected. The results of the characterization by Fourier transform infrared vibrational spectroscopy (FTIR) showed high similarity between the materials. Ultraviolet-visible spectroscopy revealed that the materials do not present electronic transitions in the region of interest (530 nm, 573 nm and 650 nm). Differential scanning calorimetry for PMMA samples from renewable sources revealed a glass transition temperature lower than that reported in the literature, which may be related to the addition of plasticizers. Thermogravimetry revealed that samples of renewable origin present broader peaks than samples of fossil origin, indicating that more than one decomposition reaction occurs simultaneously, but at different speeds. In conclusion, it was possible to observe that PMMA from fossil and renewable sources have similar structures, thus making the material viable for replacement in the construction of a POF.

KEYWORDS: Characterization; PMMA; Sustainability; Plastic Optical Fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de uma POF.....	18
Figura 2 - Dimensões de uma Fibra Óptica.....	24
Figura 3 – Estrutura molecular do PMMA.....	27
Figura 4 - Capacidade de produção global de biopolímeros.....	28
Figura 5 - Citações Gerais de Biopolímeros Naturais na Web of Science.....	30
Figura 6 - Esquematização de uma RBS Roadmap.....	34
Figura 7 - Amostra de PMMA em formato de <i>pellets</i> . (a) PMMA de fontes renováveis, e (b) PMMA de fontes fósseis.....	35
Figura 8 - Arranjo montado para a criação das pré-formas.....	36
Figura 9 - Lâminas de PMMA de origem fóssil e renovável.....	37
Figura 10 - <i>Pellets</i> das amostras de PMMA transformados em pó a partir do congelamento por nitrogênio.....	38
Figura 11 - Arranjo do teste de biodegradação das lâminas e dos pellets na superfície do solo antes de serem enterrados.....	39
Figura 12 – Gota de água no filme da amostra FOS70 para: a) lado inferior e b) lado superior..	40
Figura 13 - Gotas de água deionizada na superfície dos filmes de PMMA para a medição do ângulo de contato.....	40
Figura 14 - Filmes de PMMA obtidos a partir das amostras de pellets (a) REN68, (b) REN69, (c) FOS70 e (d) FOS71.....	44
Figura 15 - Pré-formas produzidas a partir das amostras REN68, REN69, FOS70 e FOS71 respectivamente.....	45
Figura 16 - Espectros Eletrônicos dos filmes de PMMA na Região do Ultravioleta-visível.....	46
Figura 17 - Espectros vibracionais das amostras com (a) fontes renováveis, (b) fontes fósseis e (c) a indicação dos picos para a principal região povoada.....	48

Figura 18 - Curvas de TGA para todas as amostras obtidas de origem fóssil e renovável.....	49
Figura 19 - Sobreposição das curvas das derivadas da perda de massa para cada amostra.....	50
Figura 20 - Curvas de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para a amostra REN68.....	51
Figura 21 - Curva referente ao segundo aquecimento da amostra REN68.....	52
Figura 22 - Curvas ampliadas referentes ao segundo aquecimento para (a) REN69, (b) FOS70 e (c) FOS71.....	53
Figura 23 - Proporção de perda de massa (g) em função dos dias para as amostras de lâminas de PMMA.....	54
Figura 24 - Proporção de perda de massa (g) em função dos dias para as amostras de <i>pellets</i> de PMMA.....	55
Figura 25 - Diminuição gradativa dos valores de ângulo de contato para as amostras (a) REN68, (b) REN69 e (c) FOS.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporções de solventes utilizados para obter os filmes com a melhor transparência.....	44
Tabela 2 - Proporções de massa, temperatura, tempo, nível de fusão e nível de borbulhamento para as amostras REN68, REN69, FOS70 e FOS71.....	45
Tabela 3 – Atribuição FTIR para as amostras e comparação com os dados reportados na literatura.....	46
Tabela 4 - Temperaturas em que ocorreram as principais perdas de massa.....	49
Tabela 5 - Valores encontrados para as amostras em estudo.....	52
Tabela 6 - Valores médios para as medidas de ângulo de contato.....	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Palavras-chave selecionadas para a RBS.....	33
Quadro 2 – Aplicação do Filtro 1: Leitura do resumo, título e palavras-chave.....	41
Quadro 3 - Aplicação do Filtro 2: Leitura da Introdução e Conclusão.....	42
Quadro 4 – Aplicação do Filtro 3: Leitura completa.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FTIR	Espectroscopia Vibracional na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier
GEE	Gases de Efeito Estufa
GOF	Fibra Óptica de Vidro (do inglês, <i>Glass Optical Fiber</i>)
LAN	Rede local
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PMMA	Poli(metacrilato de metila)
POF	Fibra Óptica de Plástico (do inglês, <i>Polymer Optical Fiber</i>)
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
RoHS	Restrição de Substâncias Perigosas
TGA	Análise Termogravimétrica
UV-Vis	Espectroscopia Eletrônica na Região do Ultravioleta Visível
WEEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (do inglês, <i>Waste from Electrical and Electronic Equipment</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	OBJETIVOS.....	22
2.1	OBJETIVO GERAL.....	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
3.1	FIBRAS ÓPTICAS.....	24
3.1.1	Fibras Ópticas Plásticas (POFs).....	24
3.1.2	Aplicação das POFs.....	25
3.1.3	Utilização do PMMA para a fabricação das POFs.....	26
3.2	BIOPOLÍMEROS.....	28
3.2.1	Importância da utilização de biopolímeros para a fabricação de POFs.....	30
3.3	LEGISLAÇÃO.....	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS).....	33
4.2	FABRICAÇÃO DOS FILMES A PARTIR DAS AMOSTRAS DE PMMA.....	34
4.3	FABRICAÇÃO DAS PRÉ-FORMAS A PARTIR DAS AMOSTRAS DE PMMA.....	35
4.4	FABRICAÇÃO DAS LÂMINAS PRODUZIDAS A PARTIR DAS PRÉ-FORMAS DE PMMA.....	36
4.5	CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES E DOS PELLETS DAS AMOSTRAS DE PMMA.....	37
4.6	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO AMBIENTAL.....	38
4.7	ÂNGULO DE CONTATO.....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1	RBS.....	41
5.2	TESTE DE SOLUBILIDADE.....	45
5.3	CRIAÇÃO DAS PRÉ-FORMAS.....	46
5.4	UV-Vis.....	47
5.5	FTIR.....	48
5.6	TGA/TGD.....	50
5.7	DSC.....	52

5.8	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA BIODEGRADABILIDADE.....	55
5.9	ÂNGULO DE CONTATO.....	57
6	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS.....	61

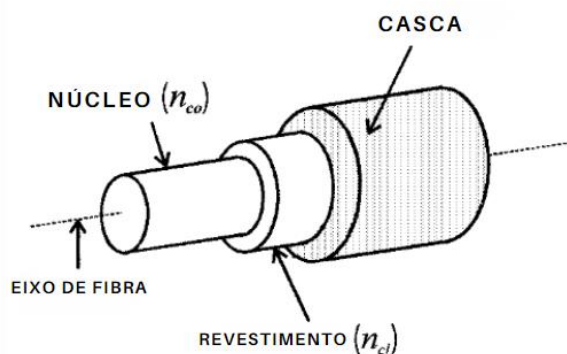
1. INTRODUÇÃO

Por mais de meio século, as fibras ópticas têm sido alvo de contínuos avanços e pesquisas inovadoras. O setor de telecomunicações tem experimentado um notável crescimento em todo o mundo, impulsionado pela crescente demanda da sociedade por informação e tecnologia de alta velocidade. A expansão das redes de fibra óptica tem revolucionado não apenas as comunicações globais, mas também áreas como a medicina, a indústria e a pesquisa científica, abrindo caminho para novas possibilidades e avanços tecnológicos. (BHOWMIK *et al.*, 2019).

A produção de fibras ópticas pode ser realizada utilizando vidro ou plástico como matéria-prima. As fibras ópticas de vidro, do inglês *Glass Optical Fiber* (GOF), são amplamente empregadas na indústria de telecomunicações devido à sua alta eficiência e capacidade de transmissão de dados em longas distâncias. Por outro lado, as fibras ópticas plásticas, do inglês *Polymer Optical Fiber* (POF), são mais frequentemente utilizadas em aplicações de iluminação, instrumentação ou decoração de ambientes, graças à sua flexibilidade e facilidade de manipulação. Essa distinção entre os materiais utilizados reflete as diferentes demandas e requisitos de desempenho em diversos setores nos quais as fibras ópticas desempenham um papel crucial, impulsionando a inovação e a expansão contínua dessas tecnologias.

As POFs usadas para comunicações ópticas são guias de ondas altamente flexíveis compostos de materiais dielétricos transparentes. A estrutura de uma POF pode ser dividida em três partes, núcleo, casca e revestimento, como mostrado na Figura 1. O diâmetro do núcleo usualmente varia entre 0,2 e 1,0 mm, a maior parte da luz propaga ao longo do núcleo, o que se consegue recobrando o núcleo com uma casca de menor índice de refração (ZUBIA, 2001). Valores típicos para o índice de refração de uma POF de PMMA são 1,492 para o núcleo e 1,417 para a casca.

Figura 1 - Estrutura de uma POF



Fonte: Zubia (2001).

Uma fibra pode ser classificada como monomodo ou multimodo, do ponto de vista da propagação (ZUBIA; ARRUE, 2001). As fibras monomodo possuem um diâmetro de núcleo pequeno, cerca de 8 ou 9 μm , onde sua capacidade permite a transmissão de um único feixe de luz, ou seja, um modo de propagação, isso faz com que ele tenha uma menor perda de luz, mesmo em curvas e em grandes distâncias. Já as fibras multimodo podem transmitir vários feixes de luz simultaneamente, podendo apresentar um diâmetro de núcleo de 50, 62,5 ou 80 e 100 μm , e geralmente são fibras de plástico altamente tecnológicas, mas que não são tão eficientes quanto o vidro. Os cabos multimodo apresentam uma maior perda do feixe de luz em grandes distâncias, principalmente com muitas curvas. Portanto ele é indicado apenas para conexões de curta ou média distância (CABLENA BRASIL, 1998).

As POFs ganharam visibilidade ao longo das últimas décadas como uma substituição para cabos coaxiais em aplicações de transmissão de dados de curto alcance (WASEEM, *et al.*, 2022). A atenuação de um material é sempre a questão mais desafiadora para as POFs com o propósito de transmissão de dados, onde refere-se à redução da amplitude de um sinal em um meio de transmissão à medida que percorre uma distância. O coeficiente de atenuação é dado em decibéis por quilômetro (dB/km) (OGHLAH, 2017; BHOWMIK, *et al.*, 2019).

As POFs possuem uma maior atenuação óptica se comparadas com as GOFs, porém seu maior diâmetro de núcleo e flexibilidade facilitam o manuseio e aumentam os raios de curvatura (INOUE, *et al.* 2019), resultando em uma vantajosa forma de instalação e baixos custos de manutenção (KOIKE; ASAI, 2009).

As POFs também têm um grande papel na área de sensores ópticos, por serem capazes de detectar diversas magnitudes como temperatura, tensão, radiação, pressão, nível de líquido e sensoriamento químico (ZHANG, *et al.* 2021; BONEFACINO, *et al.* 2022; ZHANG, *et al.* 2022; SAFARLOO, *et al.* 2022; BAO, *et al.* 2022; CENNAMO, *et al.* 2022). Podendo ser fabricadas com Poli(metacrilato de metila) (PMMA), Poliestireno (PS) e Policarbonato (PC). sendo o PMMA o mais utilizado (ZIEMANN, *et al.* 2008; SHUKLA, *et al.* 2019).

Ao passo que são muito utilizadas, as POFs causam significativos impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida, onde cerca de 70% do custo que se associa ao plástico, deriva da extração e de todo o processamento de matéria-prima fóssil, fazendo com que o valor do plástico de origem fóssil aumente em 44% se todos os impactos causados forem pagos pelas empresas que os utilizam (PELLIS, *et al.* 2021).

A utilização em larga escala de produtos plásticos para a indústria de telecomunicações, representa uma contribuição significativa para os resíduos, que geram poluição ambiental

considerável, com conhecidos impactos ambientais ao longo das fases do ciclo de vida desses produtos (FARDIM, *et al.* 2021).

Há uma forte pressão sobre o setor eletroeletrônico exercida por regulamentações, legislações e adaptações para melhorar a sustentabilidade ambiental de seus produtos e serviços (LOZANO, *et al.* 2011; KIRON, *et al.* 2013). Tal condição para a sustentabilidade envolve também o setor de telecomunicações no cenário nacional e mercado internacional (EWALD, *et al.* 2011; SILVEIRA, *et al.* 2013; MOHANTY, *et al.* 2014; VALINEJAD, *et al.* 2018; WU, *et al.* 2018; MALI, *et al.* 2018).

A adoção de biopolímeros como alternativas mais sustentáveis sem que se perca a qualidade técnica e a viabilidade econômica, tem sido sugerida em diversos trabalhos (BRITO, *et al.*, 2011; ZHU, *et al.*, 2016; TAKHUR, *et al.* 2018). Existem diferentes tipos, aplicações e classificações de biopolímeros. Por exemplo, eles podem ser divididos de acordo com sua fonte, o número de unidades monoméricas como açúcares, aminoácidos e nucleotídeos, a degradabilidade e o comportamento em relação ao aquecimento (BRITO, *et al.* 2011).

A degradabilidade de um biopolímero pode depender de vários fatores como temperatura, umidade, população microbiana, o tipo de ambiente e a quantidade de exposição a luz. O tempo para que a degradação aconteça pode variar de acordo com as condições, podendo ser acelerado por meio de compostagem (KARAM, *et al.* 2004).

Os biopolímeros podem ser classificados de acordo com sua fonte, mais especificamente em relação ao seu material de origem, que é renovável (BARANWAL, *et al.*, 2022) como milho, cana-de-açúcar, celulose, quitina entre outros. Materiais de fontes renováveis têm curtos períodos de ciclagem natural quando comparados com fontes não renováveis. Assim, ao eliminar a extração e a disposição dos materiais de fontes não-renováveis, haverá potencial para a redução de impactos ambientais negativos. Nesse sentido, os biopolímeros representam uma solução para a escassez de recursos que podem impactar negativamente diversos setores econômicos, incluindo telecomunicações (BRITO, *et al.*, 2011).

Segundo Zhu, Romain e Williams (2016), os biopolímeros têm sido cada vez mais aplicados nos setores têxtil, médico, eletrônico, automotivo e aeroespacial para reduzir os impactos ambientais associados às etapas de extração e fim de vida dos produtos, bem como para as fases de fabricação e uso dos produtos. As empresas têm investido na tecnologia de fabricação de biopolímeros, em especial, do PMMA totalmente produzido a partir de açúcar (BARANWAL *et al.*, 2022).

Apesar dessa tendência, a aplicação de biopolímeros ainda é incipiente, principalmente dentro do setor de telecomunicações, que se apresenta como uma lacuna teórico-científica

promissora. Nesse sentido, o desempenho tecnológico esperado pelas telecomunicações é essencial para o avanço dos polímeros de fontes renováveis neste setor da economia mundial. Então, a maior relevância deste trabalho se deve a investigação da possibilidade da introdução e substituição de um PMMA de origem fóssil por uma alternativa com menor impacto ambiental dentro do setor de telecomunicações, ou seja, um PMMA de origem renovável. Devido a este potencial de utilização, a introdução desta nova fibra óptica, bem como a análise comparativa dos seus desempenhos pode contribuir significativamente para a sustentabilidade deste e de outros setores produtivos, visando o desenvolvimento tecnológico sustentável.

Para que se torne possível a produção das POFs com núcleo de origem renovável, as amostras passaram por uma caracterização estrutural e posteriormente por um teste de biodegradação para maior conhecimento de todo o material.

A substituição de um polímero de fonte fóssil pelo polímero de fonte renovável apresenta um potencial de aumento de sustentabilidade ambiental. Para tecer-se esta afirmação, fez-se necessário a aplicação de um teste de biodegradação, para que fosse possível observar o desempenho desses materiais no meio-ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar o desempenho tecnológico e a degradabilidade de dois tipos de PMMA, de origem fóssil e de origem renovável, para posterior confecção de fibras ópticas.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral do trabalho, fez-se necessária a proposta dos seguintes objetivos específicos:

- I. Caracterizar as amostras para a verificação de possíveis diferenças estruturais entre os polímeros;
- II. Analisar comparativamente as taxas de biodegradação dos dois tipos de polímeros na forma de *pellets*;
- III. Analisar comparativamente as taxas de biodegradação dos dois tipos de polímeros na forma de filmes;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

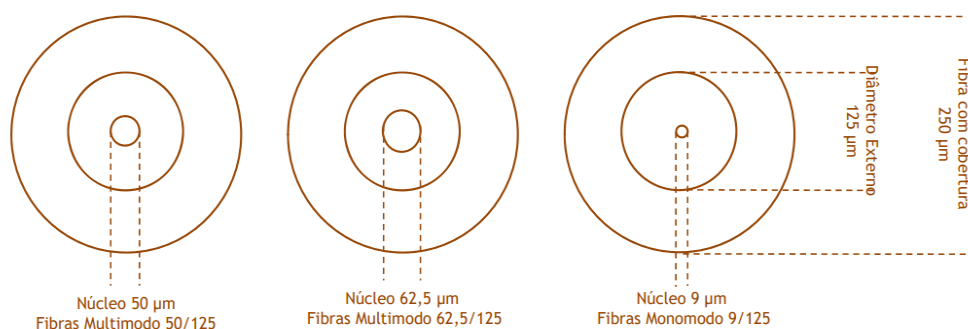
3.1. FIBRAS ÓPTICAS

As fibras ópticas estão em desenvolvimento e pesquisa há mais de 50 anos. O setor de telecomunicações e toda a capacidade baseada em fibras ópticas tem se expandido em todo o mundo, tendo em vista a rapidez com que a demanda da sociedade pela informação e tecnologia tem se desenvolvido (BHOWMIK *et al.*, 2019).

A fabricação de uma fibra óptica pode ser feita utilizando-se como matéria prima o vidro ou plástico. Comumente, as fibras ópticas plásticas, são mais utilizadas para fins de iluminação, instrumentação ou decoração, enquanto as mais utilizadas para a área de telecomunicações são as fibras ópticas de vidro. Se comparadas aos fios de cobre, as fibras ópticas de vidro tem grande vantagem para transmissão de sinais tais como, baixa atenuação que permite alcançar grandes distâncias sem a necessidade de repetidores, grande capacidade de transmissão de informações em formato analógico ou digital, imunidade a interferência eletromagnética e fisicamente são leves e compactas (CABLENA BRASIL, 1998).

Como pode-se observar na Figura 2, o diâmetro externo de uma fibra tem uma medida padrão de 125 μm , com exceção da fibra com o núcleo de 100 μm que possui um diâmetro externo de 140 μm de revestimento. Ao redor do vidro, há uma cobertura plástica de proteção com 250 μm (CABLENA BRASIL, 1998).

Figura 2 - Dimensões de uma fibra óptica



Fonte: Cablena Brasil (1998).

3.1.1. Fibras Ópticas Plásticas (POFs)

O interesse em Fibras Ópticas Plásticas cresceu durante a década de 1990, à medida que a necessidade de fibras mais baratas e capazes de transmitir dados em curtas distâncias (normalmente <1 km) tornou-se evidente (SOHRABTASH, *et al.*, 2017; ALEXANDRIS, *et al.*,

2018; TSAKYRIDIS, *et al.*, 2019; RAUSCHENBACH, *et al.*, 1994; ZHENG, *et al.*, 2000; SAKAMOTO, *et al.*, 2001)

Tais fibras têm um núcleo relativamente grande (diâmetro de ~ 1 mm), resultando em uma grande abertura numérica, mas eles apresentam perdas elevadas (normalmente superiores a 20 dB/km). Por esta razão, eles são usados para transmitir dados em taxas de bits de até 10 Gb/s em distâncias curtas.

O manuseio das POFs é mais seguro e fácil, devido a sua maior resistência à flexão, choque e vibração se comparadas com as GOFs que devem ser manuseadas com mais cuidado e segurança, trazendo assim uma maior facilidade de alinhamento e implementação de conectores nas POFs (POLISHUK, 2006; ZIEMANN *et al.* 2008).

Na fabricação de fibras ópticas plásticas são comumente empregados materiais plásticos de baixo custo, como o PMMA, o Poliestireno (PS) e o Policarbonato (PC), com o PMMA tendo uma janela de transmissão na faixa visível (500 - 800 nm). O PMMA tem sido o principal material termoplástico utilizado, pois à sua alta transparência e excelente qualidade óptica com abertura numérica (0,47) e baixo índice de refração (1,49), superam a sílica empregada para fabricação de fibras ópticas de vidro que apresentam índice de refração de 1,46 e abertura numérica de 1,47 (SHUKLA, 2019). Em comparação com as GOFs, as POFs têm uma maior flexibilidade devido ao seu maior diâmetro de núcleo (normalmente 0,2 ~ 1 mm de diâmetro), tendo uma alta tensão de ruptura (PENG, 2002).

Por outro lado, as fibras ópticas plásticas apresentam um aspecto importante para consideração: a atenuação (KOIKE; ASAI, 2009; RODRIGUES; PINHO, 2014). A atenuação de um material é sempre a questão mais desafiadora para as POFs com o propósito de transmissão de dados em um sistema de fibra óptica. Esta medida determina as perdas do sinal ao longo da propagação do pulso, onde é importante caracterizar a estrutura para prever o valor de atenuação (OGHLAH, 2017; BHOWMIK *et al.*, 2019). As POFs apresentam menores picos de atenuação no espectro visível, 450 nm a 750 nm, com uma atenuação variando de 80 dB/km a 120 dB/km em uma janela de transmissão de aproximadamente 570-650 nm, faixa de menor atenuação usada para o PMMA (FISCHER, *et al.*, 2015; BHOWMIK *et al.*, 2019).

3.1.2. Aplicação das POFs

As fibras ópticas plásticas têm muitas das mesmas vantagens que as convencionais fibras ópticas de vidro para aplicações de detecção. Essas vantagens incluem baixo peso, imunidade a interferências eletromagnéticas e capacidade de multiplexação. No geral, as POFs fornecem uma alternativa de baixo custo, embora tenham uma maior perda de transmissão, portanto foram

aplicadas para transmissão de dados em curtas distâncias como acesso em rede local, do inglês *Local Area Network* (LAN) para casas, conexões e aplicações automotivas (PETERS, 2011).

Os ambientes *indoor*, como casas e escritórios, fazem uso de cabos de par trançado e coaxial como meio físico para que sejam entregues serviços de telecomunicações dentro das instalações dos clientes. Tais meios de comunicação sofrem limitações para seguir a crescente demanda de serviços de banda larga, como por exemplo, o par trançado possui uma largura de banda limitada que pode ir de 1 MHz a 600 MHz, dependendo da categoria segundo a ANSI/TIA 568-C e é suscetível a interferência eletromagnética. Já o cabo coaxial oferece considerável largura de banda de aproximadamente 1 GHz, mas apresenta problemas práticos devido sua espessura e o esforço para que se faça uma conexão confiável e, além disso, não está imune a EMI (VAN DEN BOOM, *et al.*, 2001; SULAIMAN, *et al.*, 2013).

Devido a sua ductilidade e ao seu maior diâmetro de núcleo, as POFs são atraentes para redes prediais, com interesses voltados para links de dados de baixo custo e de curta distância. A principal desvantagem de uma POF de PMMA é sua alta perda de transmissão (120 dB/km a 650 nm), o que limita o uso de uma PMMA-POF para transmissão de dados a curtas distâncias de até 200 m. Para que se possa superar este problema de alta atenuação da POF, é possível utilizar receptores ópticos altamente sensíveis para aumentar o comprimento de onda da transmissão (ATEF, *et al.*, 2011).

Uma outra aplicação para as POFs, está em sistemas de dados em automóveis, onde são usados predominantemente para transmissão de informações e entretenimento, incluindo sistemas de som, navegação, multimídia e amplificadores. A comunicação para aplicação automobilística é feita a curtas distâncias, de até 100 m, bem como a utilização de uma largura de banda de 100 MHz.

Pode-se destacar uma outra aplicação das fibras ópticas de plástico em plataformas aviônicas. O aumento do diâmetro das fibras poliméricas permite a instalação com menor raio de curvatura sem interrupção mecânica (FISCHER, HAUPT e JONCIC, 2011). Pela significativa complexidade e mão de obra especializada para instalação de fibras ópticas de vidro, a instalação de POFs em ambiente de aviônica comercial implica em menores custos de instalação, em relação às fibras de vidro, além dos equipamentos optoeletrônicos relativamente com menor custo.

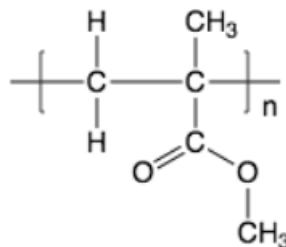
No que se refere às comunicações, os sistemas aviônicos se interconectam através de um conjunto de links dedicados (elétricos e ópticos) tais como uma central de controle. O aumento da demanda e a complexidade da rede de dados aviônicos tem requerido maior largura de banda. Contudo, a interferência em fatores como custo da implementação de uma rede de

comunicações, tempo e peso dos cabos levam a necessidade de estabelecimento de restrições de projeto. Uma rede de comunicações em aeronaves promove o gerenciamento de falhas, e gerenciamento de integridade física da aeronave. A substituição de cabos de cobre por fibra óptica possibilita maior redundância, na qual a falha de um dos enlaces pode ser suprida por vias alternativas de comunicação. A eliminação do cobre na sobreposição de cabos, com a substituição por fibra óptica tende a redução de peso (HABIBY, 2009), que é um requisito em constante busca pelo setor aeronáutico.

3.1.3. Utilização do PMMA para a fabricação das POFs

O PMMA é um polímero sintético que pertence à família dos acrílicos e sua composição química é baseada em unidades repetitivas de monômeros de metacrilato de metila. A fórmula molecular do monômero é $C_5H_8O_2$ e sua reação de polimerização transforma esses monômeros em longas cadeias poliméricas, formando a estrutura molecular apresentada na Figura 3 (DA SILVA, REINALDO *et al.*, 2017).

Figura 3 - Estrutura molecular do PMMA



Fonte: Da Silva, *et al.* (2017).

O PMMA possui uma transmitância de ordem 92% na região do espectro visível, possuindo consequentemente uma menor atenuação e apresenta um índice de refração de 1,49, sendo suficientemente alto para a aplicação em lentes e outras aplicações com finalidades ópticas (JORDÃO, *et al.*, 2000).

Se comparados a outros polímeros como PS, PC e poliamidas, o PMMA apresenta melhores propriedades ópticas e mecânicas. Em relação a estabilidade térmica, as fibras ópticas constituídas de PMMA apresentam uma estabilidade de 80 °C se comparadas ao PC que apresenta uma estabilidade de 120 °C (BARTOLI, 2006). Em relação as propriedades mecânicas, o PMMA pode resistir a deformações elásticas de até 13%, enquanto para o PS este valor é de até 6% (BARTOLI; PAULO, 2004).

A utilização do PMMA é uma opção devido ao seu amplo uso na confecção de fibras ópticas poliméricas e guias de onda, onde ainda pode ser utilizado como núcleo ou como casca em guias de onda (WHITE, *et al.*, 1995; LI, *et al.*, 2001).

Tendo o PMMA como base, algumas blendas poliméricas estão sendo estudadas para a possível confecção de POFs para a aplicação na área de transmissão de dados (NALWA, 2004).

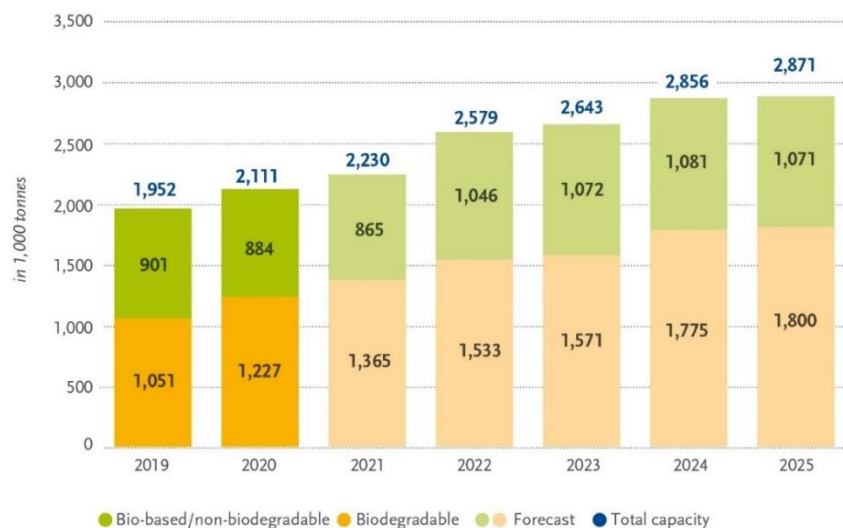
3.2. BIOPOLÍMEROS

Diante dos resultados de menor pegada de carbono, redução de resíduos, maior biodegradabilidade e diminuição dos custos de energia, os biopolímeros possuem um elevado potencial de crescimento.

Materiais poliméricos naturais como algodão, madeira, seda, lã, e couro têm sido usados há séculos, e sua estrutura e propriedades funcionais influenciaram o desenvolvimento de polímeros à base de petróleo. Segundo Otoni *et al.* (2017), o uso de subprodutos baratos e subutilizados do processamento de produtos orgânicos, é uma estratégia promissora para a obtenção de produtos mais baratos, e que ainda apresentem características sensoriais e físico-químicas que os distinguem de produtos constituídos por polímeros convencionais.

O tamanho do mercado global de bioplásticos e biopolímeros foi de US\$ 11,5 bilhões em 2022 e deve atingir US\$ 27,3 bilhões até 2027. Já a capacidade mundial de produção deve aumentar de cerca de 2,1 milhões de toneladas para 2,8 milhões de toneladas entre 2020 e 2025, como se pode observar na Figura 4 onde há um crescimento dinâmico e contínuo dentro da indústria global de bioplásticos (EUBP – European BIOPLASTICS, 2020).

Figura 4 - Capacidade de produção global de biopolímeros



Fonte: EUBP (2020).

Os biopolímeros são materiais que se apresentam como alternativas naturais aos polímeros sintéticos, e podem ser produzidos pela ligação covalente de suas unidades monoméricas compostas por aminoácidos, ácidos nucleicos e monossacarídeos. São compostos por moléculas de cadeia longa linear ou ramificada, que contém unidades repetidas de monômeros que são facilmente degradadas por microrganismos encontrados no meio ambiente (KHADEMIAN *et al.*, 2020; PANDIAN *et al.*, 2021).

A maioria dos biopolímeros são derivados de fontes biológicas que incluem microrganismos, resíduos agrícolas e biomassa vegetal. Como são obtidos naturalmente a partir do ecossistema, possuem um maior valor econômico e maior biodegradabilidade (UDAYAKUMAR *et al.*, 2021).

Os biopolímeros são polissacarídeos produzidos a partir de fontes renováveis por ação microbiana, por plantas, animais e síntese química, possuindo as mesmas propriedades de um plástico comum, onde podem ser fabricados a partir de resíduos de milho e cana-de-açúcar entre outros. Entre os exemplos de biopolímeros estão celulose, amido, quitina e proteínas. Grande parte desses elementos, apresentam natureza renovável, sendo uma fonte sustentável com vasta aplicabilidade em indústrias (FERRERA-HARRAR e DAIRI, 2014; DE SOUZA, *et al.*, 2021).

Biopolímeros tem ganhado espaço e atenção nos últimos anos devido à sua abundância e versatilidade em suas propriedades, tais como a não toxicidade, biocompatibilidade, biodegradabilidade, renovabilidade e flexibilidade (BILAL e IQBAL, 2019).

Devido às suas qualidades benéficas, eles têm numerosos usos, significativos em diversos campos, incluindo embalagens de alimentos, materiais de bioengenharia, tratamento de águas residuais, agentes anticorrosivos e muito mais (GOPINATH, *et al.*, 2023; SUN, *et al.*, 2022)

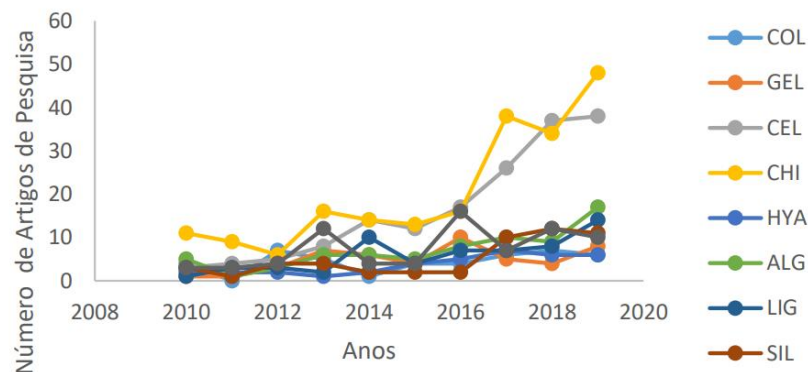
Um dos fatores mais importantes a serem considerados ao se comparar o efeito ambiental do biopolímero para o polímero derivado de combustíveis fósseis, é a seleção da matéria-prima. Por exemplo, é comum fornecer biopolímeros derivados de açúcares fermentados, como a cana-de-açúcar, a sacarina da beterraba e ao longo de culturas de cereais como o milho. Isso acontece principalmente porque não há concorrência com a produção de alimentos e subprodutos ou resíduos que podem ser utilizados como açúcares. (STOICA, *et al.*, 2022)

Diversas pesquisas estão sendo realizadas com o objetivo de obter novos biopolímeros, principalmente biopolímeros obtidos de subprodutos agroindustriais pois o aproveitamento desses recursos contribui para o desenvolvimento de medidas sustentáveis (MARAVEAS, 2020).

Os polímeros sintéticos possuem algumas vantagens por serem mais baratos, práticos e estáveis. Por outro lado, estão espalhados por todo o mundo, o que acaba provocando danos severos ao ecossistema por não serem biodegradáveis (GAUR, *et al.*, 2021).

Dado o aumento significativo para a procura de se desenvolver biopolímeros, Silva e Beppu (2022) realizaram uma análise de dados relacionados à polímeros de interesse como colágeno, gelatina, celulose, quitosana, ácido hialurônico, alginato, seda, amido e lignina, possibilitando o entendimento da incidência desses termos dentro de plataformas de pesquisa durante uma base de tempo de dez anos (2010-2019). Através desta pesquisa, notou-se uma elevação a partir do ano de 2015, como pode-se observar na Figura 5, com relação a pesquisas de biopolímeros naturais, fato que pode ser explicado pelas políticas de sustentabilidade assumidas pelos países desenvolvidos, por empresas multinacionais e pela agenda 2030 de sustentabilidade da ONU, lançada em 2015.

Figura 5 - Citações Gerais de Biopolímeros Naturais na Web of Science



Fonte: Silva e Beppu (2022).

À medida que o mundo se torna mais focado no desenvolvimento sustentável, certos materiais que não são biodegradáveis serão eventualmente eliminados. A futura escassez de combustíveis fósseis aumentou o interesse na adoção de polímeros ecológicos, impulsionando a criação de materiais biodegradáveis e alternativas não tóxicas (McDEVITT, *et al.*, 2017; KITSARA, *et al.*, 2015)

3.2.1. Importância da utilização de biopolímeros para a fabricação de POFs

De acordo com Pan *et al.* (2016), as propriedades dos polímeros biodegradáveis são semelhantes às dos convencionais, exceto pela questão de que os plásticos biodegradáveis se decompõem naturalmente devido às atividades de microrganismos, produzindo dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O) como subprodutos. O processo de degradação também dá origem

a outras substâncias naturais, como metano, biomassa e matéria húmica, que são prontamente eliminados sem causar efeitos nocivos ao meio ambiente (GILL, 2014).

Cerca de 70% do custo do capital natural que se associa ao plástico, deriva da extração e de todo o processamento de matéria-prima fóssil, fazendo com que o valor do plástico de origem fóssil aumente em 44% se todos os impactos causados forem pagos pelas empresas que os utilizam. Os polímeros de base biológica representam uma parte importante para a bioeconomia e, em 2019 o volume total de produção dos biopolímeros foi em torno de 3,8 Mt, correspondendo a 1% do volume de produção de polímeros petroquímicos. Causas ambientais e sustentáveis impulsionam cada vez mais o desenvolvimento de polímeros e plásticos renováveis, apesar de sua produção se encontrar numa posição difícil no mercado por precisarem competir com os sistemas de origem fóssil que já são altamente otimizados e produzidos em alto nível (PELLIS, *et al.*, 2021).

Na última década, os polímeros que são reforçados com fibras renováveis receberam muita atenção e se tornaram uma classe de materiais atraentes, devido ao seu alto desempenho mecânico e por fornecerem alternativas mais sustentáveis aos compósitos convencionais e baixo potencial de impacto ambiental (SLAPNIK, *et al.*, 2021).

O uso de plásticos de origem renovável ao invés de fóssil, é um caminho para uma melhor sustentabilidade favorecendo a preservação de recursos, o crescimento e desenvolvimento de países emergentes e o consumo de CO₂ ao invés de emissão. No entanto, deve-se citar que a energia necessária para a produção desses polímeros é produzida por métodos convencionais, incluindo o uso de combustíveis fósseis e energia nuclear. Conseqüentemente, vários parâmetros são afetados, tais como o consumo de recursos fósseis, algumas políticas de países, emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa (GEE), poluição, pegada de carbono etc. (BIRON, 2017).

3.3. LEGISLAÇÃO

Atualmente, o desenvolvimento de tecnologias que minimizem o impacto ambiental tem adquirido uma importância enorme (FARDIM, *et al.* 2021). De acordo com o relatório do *The Global E-waste Monitor* de 2019, um recorde de 53,6 milhões de toneladas de Resíduos de Equipamentos Eletrônicos foram gerados em todo o mundo.

Valinejad e Rahmani 2018, expressam a importância de uma compreensão profunda da oferta e das cadeias produtivas dentro da indústria de telecomunicações, a fim de estudar mecanismos de redução dos GEE. Esses mesmos autores apontaram que se deve atentar para impactos ambientais deste setor econômico devido aos curtos ciclos de vida de seus produtos.

Por outro lado, Wu et al. 2018, estudaram o estado da arte da relação entre telecomunicações e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 das Nações Unidas, concluindo que as tecnologias de telecomunicações têm um potencial significativo para a promoção da sustentabilidade ambiental em diversos setores da economia mundial.

No âmbito brasileiro existe a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), enquanto no mercado internacional, algumas das mais notáveis diretivas que definem os requisitos legais para gerenciamento de lixo eletrônico são a) a Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE) da União Europeia (DIRECTIVE, 2012); b) A diretiva Restrição de Substâncias Perigosas (RoHS), também da União Europeia (DIRECTIVE, 2011). Além desses mecanismos legais, existem normas de certificação ambiental como a IECQ QC 08000 que abrange os principais requisitos das várias diretivas de proteção ambiental, buscando minimizar ou eliminar a produção de substâncias perigosas para garantir a sustentabilidade do meio ambiente e, principalmente, ISO 14001, que têm uma influência importante na competitividade e sustentabilidade do setor de telecomunicações (WALD, 2014; SILVEIRA, 2013).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS)

O método utilizado para o desenvolvimento do trabalho foi uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), compreendida como um processo de coletar, conhecer, compreender, analisar, sintetizar e avaliar um conjunto de artigos científicos com o propósito de criar um embasamento teórico-científico (estado da arte) sobre um determinado tópico ou assunto pesquisado (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011 adaptado de LEVY; ELLIS, 2006), com o modelo RBS Roadmap capaz de auxiliar os estudos na área de gestão de operações com foco em gerenciar projetos e desenvolver produtos.

Este método é composto por três fases principais, Entrada, Processamento e Saída. Na fase de Entrada estão as informações que serão processadas, tais como artigos relacionados à área de estudo, livros e trabalhos de referência indicados por especialistas que servirão para alimentar a fase de Processamento, que irá conhecer e compreender a literatura, aplicar a revisão, analisar, compilar e avaliar resultados que por fim, irão gerar os materiais de Saída como relatórios, síntese de resultados e criação de novos estudos (LEVY; ELLIS; 2006).

Na fase de Entrada é necessário que se adote uma base de dados de referência, para que os testes com as palavras-chaves obtenham um melhor resultado (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011). A Science Direct foi selecionada como a melhor base de dados para referenciar o trabalho e testar as diversas combinações das palavras-chave selecionadas, apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Palavras-chave selecionadas para a RBS

<i>Polymer Optical Fiber</i>	<i>Renewable PMMA</i>
<i>Environmental Impact</i>	<i>Bio-PMMA</i>
<i>Life Cycle Analysis</i>	<i>Characterization</i>

Fonte: Elaborado pelo autor.

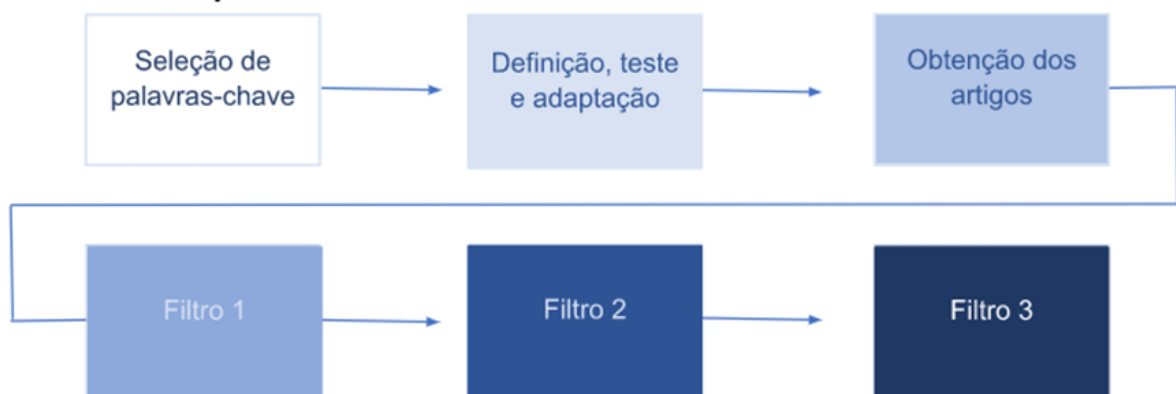
Com o arranjo pré-estabelecido ‘*polymer optical fiber*’ AND ‘*renewable PMMA*’ AND ‘*environmental impact*’ AND ‘*Life cycle analysis*’ AND ‘*characterization*’, foram obtidos no total 11 trabalhos de pesquisa, incluindo artigos e capítulos de livros.

Dando seguimento à *RBS Roadmap* (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011), foram aplicados três filtros para afunilar as buscas do material selecionado dentro da fase de processamento. O primeiro filtro consistiu na leitura do título, do resumo e das palavras-chave dos 11 materiais obtidos na primeira fase. O segundo filtro consistiu na leitura da introdução e conclusão dos trabalhos selecionados após aplicação do primeiro filtro. Ainda neste filtro, os trabalhos atenderam critérios de qualificação pré-estabelecidos para serem incluídos de acordo com o que se identifica como mais relevante para tal estudo (CONFORTO; AMARAL; SILVA, 2011) e que neste trabalho foram de:

- I. Publicações à partir de 2016; e
- II. Artigos de revisão, artigos de pesquisa e capítulos de livro; ou
- III. Usou PMMA; ou
- IV. Usou Biopolímero; ou
- V. Trata dos impactos ambientais.

Por fim, o terceiro filtro consistiu na leitura completa dos materiais que passaram pelos critérios do segundo filtro. Pode-se observar a esquematização de uma RBS na Figura 6.

Figura 6 - Esquema de uma RBS *Roadmap*.



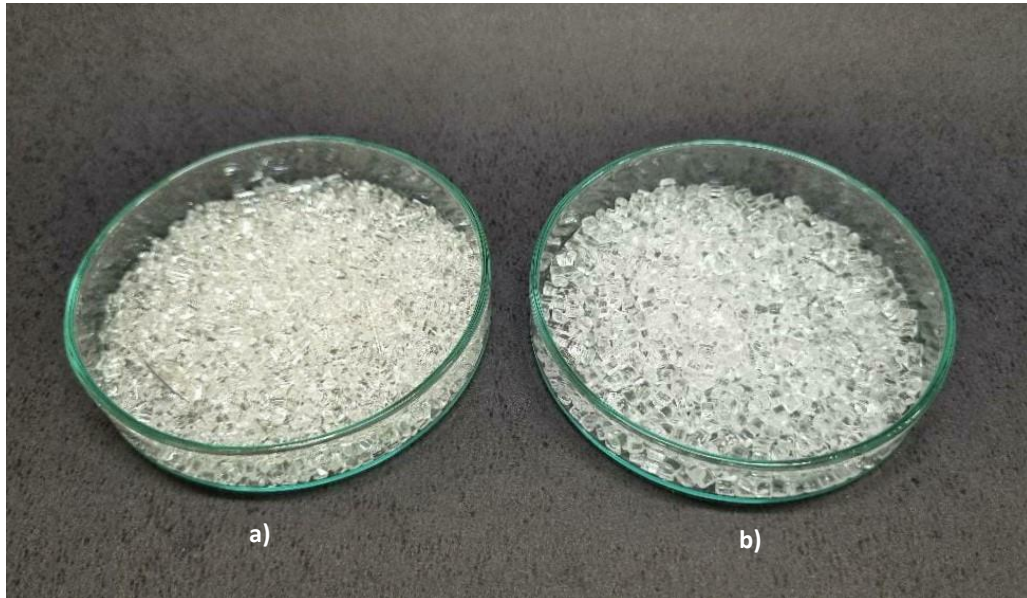
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. FABRICAÇÃO DOS FILMES A PARTIR DAS AMOSTRAS DE PMMA

As amostras de PMMA utilizadas neste estudo foram gentilmente cedidas por uma empresa que não será mencionada por questões de confidencialidade. Essas amostras de PMMA são um produto novo que não está sendo produzido em escala comercial. Por esta razão, a composição exata dos polímeros não foi especificada. As análises foram realizadas em duas amostras de PMMA de origem fóssil (FOS70 e FOS71) e duas amostras de PMMA de origem

renovável (REN68 e REN69), que foram recebidas na forma de pellets, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 - Amostras de PMMA em formato de *pellets*. (a) PMMA de fontes renováveis, e (b) PMMA de fontes fósseis



Fonte: Elaborado pelo autor.

A solubilidade dos diferentes *pellets* foi testada exploratóriamente em solventes orgânicos, tais como clorofórmio, diclorometano e acetato de etila com o objetivo de se obter filmes transparentes e homogêneos que permitissem a caracterização das amostras no tocante à transmitância da luz em determinados comprimentos de onda e a verificação da similaridade das estruturas moleculares das diferentes amostras.

Primeiramente, a solubilidade foi testada utilizando 0,5 g de soluto e 5,0 mL de solvente que foram submetidos a um agitador magnético por tempo suficiente para garantir uma solução homogênea. Isso foi feito em um sistema fechado para evitar a evaporação do solvente. A solução homogênea foi então despejada dentro de uma placa de Petri para evaporar o solvente e finalmente obter os filmes de PMMA.

4.3. FABRICAÇÃO DAS PRÉ-FORMAS A PARTIR DAS AMOSTRAS DE PMMA

Todas as pré-formas foram produzidas no Departamento de Física e Química da Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP/FEIS).

Para a fabricação das pré-formas, foi utilizada somente uma das amostras de origem fóssil, pois a partir da caracterização elas apresentaram a mesma estrutura entre si.

As amostras de PMMA REN68, REN69 e FOS em formato de *pellets* foram colocadas em forno Mufla para a criação de pré-formas, que posteriormente serviriam para a fabricação das POFs. Foram utilizados tubos de ensaio de 20x200 mm e tubos de ensaio de 18x150 mm, onde o tubo de ensaio maior acomodou a amostra e o tubo de ensaio menor com a sílica serviu como peso para que as bolhas de ar contidas nas amostras durante a fusão do material, fossem pressionadas, como pode-se observar na Figura 8.

Figura 8 - Arranjo montado para a criação das pré-formas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

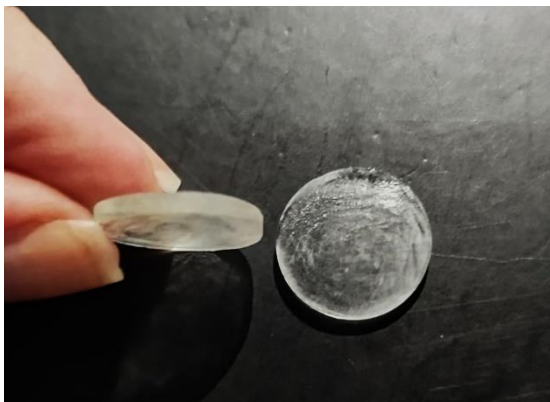
Foram testadas várias proporções de massa, temperatura e tempo, e os níveis de fusão e formação de bolhas foram categorizados usando valores de 0 até 5, com zero sendo o menor nível e 5 o maior.

4.4. FABRICAÇÃO DAS LÂMINAS PRODUZIDAS A PARTIR DAS PRÉ-FORMAS DE PMMA

Para a produção das lâminas de PMMA, as pré-formas foram cortadas com a espessura de ~1 mm, utilizando um torno.

Após o corte, as lâminas foram polidas utilizando um Grinder/Polisher Metaserv 2000, para que a superfície das lâminas ficasse mais regulares, menos porosas e mais transparentes, podendo ser observadas na Figura 9.

Figura 9 - Lâminas de PMMA de origem fóssil e renovável



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES E DOS PELLETS DAS AMOSTRAS DE PMMA

As primeiras análises realizadas para a caracterização dos materiais foram realizadas no Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo – IQSC/USP.

Nesta etapa, as análises foram realizadas com os filmes produzidos a partir das amostras de PMMA, onde o processo de caracterização incluiu espectroscopia vibracional na região do infravermelho por transformada de Fourier, do inglês *Fourier transform infrared spectroscopy* (FTIR) e análise de espectros eletrônicos na região ultravioleta-visível, do inglês *UV-visible spectroscopy* (UV-vis). Tais medições nos permitem entender as propriedades químicas das amostras.

O FTIR foi realizado na faixa de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução mínima de 1 cm^{-1} usando um espectrofotômetro Shimadzu IRTracer-100. A espectroscopia na região do ultravioleta visível, , foi realizada na faixa de 190 a 1100 nm empregando um espectrofotômetro Cary 60 equipado com uma esfera de integração de refletância difusa.

A caracterização foi ampliada com análises térmicas, Análise Termogravimétrica, do inglês *Thermogravimetric analysis* (TGA) e Calorimetria exploratória diferencial, do inglês *Differential Scanning Calorimetry* (DSC).

A DSC foi realizada empregando um DSC Q10. A taxa de aquecimento aplicada para o DSC foi de 10 °C/min de 25 °C a 300 °C sob uma atmosfera inerte.

Em um primeiro momento, para a TGA foi utilizado um analisador termogravimétrico TGA Q50 com faixa de aquecimento de 25 °C a 1000 °C em uma atmosfera que muda de inerte para oxidante a 600 °C, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

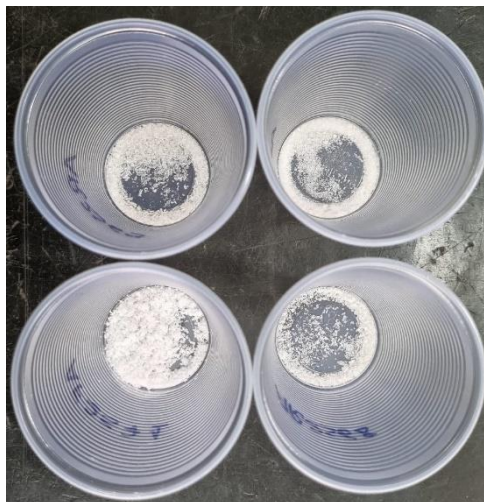
De acordo com os resultados, fez-se necessário repetir a TGA, que foi realizada no Departamento de Física e Química (UNESP Ilha Solteira).

Neste momento, a análise foi realizada a partir dos *pellets* das amostras de PMMA, que foram submetidos a um tratamento de congelamento a partir de nitrogênio líquido, pois apresentaram uma certa elasticidade, tornando impossível a sua fragmentação. A partir do congelamento, os *pellets* foram macerados e transformados em pó, como se pode observar na Figura 10, para que fosse possível realizar as análises térmicas novamente.

Para a TGA utilizou-se um analisador termogravimétrico Q600 com faixa de aquecimento de 10 °C a 1000 °C, com taxa de aquecimento de 25 °C/min.

Ambas as análises, espectroscópica e térmica, foram realizadas em amostras de PMMA de fonte fóssil e renovável, visando comparar suas estruturas.

Figura 10 - *Pellets* das amostras de PMMA transformados em pó a partir do congelamento por nitrogênio



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO AMBIENTAL

A avaliação comparativa do desempenho ambiental foi feita utilizando uma técnica de biodegradação em solo, onde o material foi enterrado totalmente no solo. Os experimentos foram feitos utilizando potes plásticos e transparentes, cobertos com filme PVC, onde houve uma adição constante de umidade para simular o processo natural de biodegradação (MARAN *et al.*, 2014).

Para que o experimento fosse realizado, o solo utilizado foi Orgânico/Mato Verde 100 % Natural, onde foram pesados 12 g antes de colocar a amostra e 12 g por cima da amostra, para que ela ficasse coberta completamente. As amostras utilizadas foram REN68, REN69 e FOS71, tanto em formato de *pellets* quanto em formato de lâminas, retiradas das pré-formas que foram produzidas. Todas as amostras foram pesadas em balança analítica de precisão e colocadas nos recipientes contendo solo, que foram mantidos em bancada em temperatura ambiente. Para que a umidade do solo fosse mantida, houve a adição de 2 mL de água destilada em todas as amostras todos os dias.

A Figura 11 demonstra o arranjo antes da segunda camada de solo ser adicionada.

Figura 11 - Arranjo do teste de biodegradação das lâminas e dos pellets na superfície do solo antes de serem enterrados



Fonte: Elaborado pelo autor

4.7. ÂNGULO DE CONTATO

O ângulo de contato é uma medida quantitativa de umedecimento de um sólido por um líquido. A interação entre um simples líquido e uma superfície sólida, pode ser estudada através desta medida e diz muito sobre as propriedades do sólido analisado (SARANTI, et al., 2021).

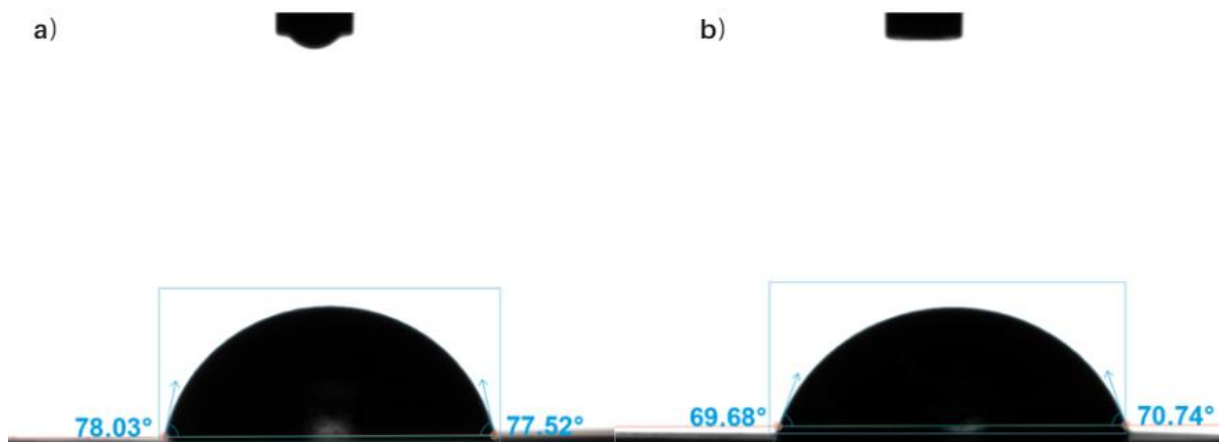
O ensaio foi realizado colocando-se uma gota de líquido em uma superfície do filme e o ângulo de contato foi medido.

Para verificar o ângulo de contato a partir dos filmes fabricados de todas as amostras, foi utilizado o equipamento Biolin Scientific Attention Theta Lite, onde foi realizada em triplicata a medição para cada amostra de cada lado do filme (inferior e superior).

Durante a verificação do ângulo de contato, o equipamento capturou imagens em todo o tempo de análise, sendo possível observar a gota de água juntamente com o seu ângulo em contato com a superfície, como podemos observar na Figura 12, onde se apresenta a gota no filme da amostra FOS70 para o lado inferior (a) e superior (b).

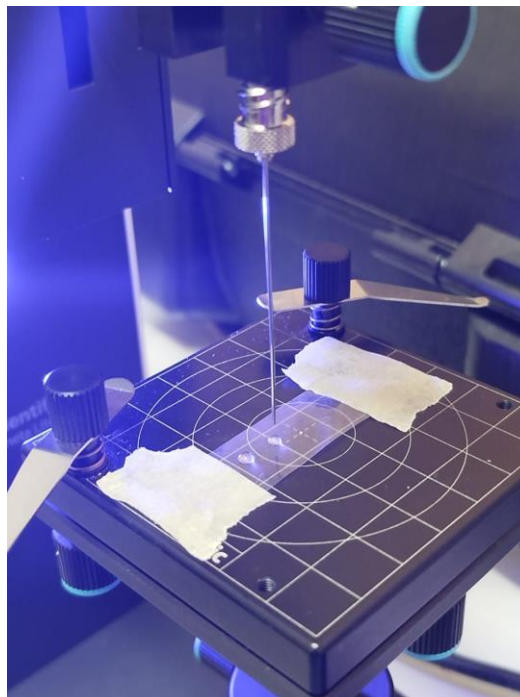
Na Figura 13 pode-se observar uma gota de 6 μL de água deionizada na superfície dos filmes fabricados a partir das amostras de PMMA.

Figura 12 - Gota de água no filme da amostra FOS70 para: a) lado inferior e b) lado superior



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 - Gotas de água deionizada na superfície dos filmes de PMMA para a medição do ângulo de contato



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. RBS

O filtro 1 foi aplicado para a amostra de 11 artigos obtidos após a definição das palavras-chave e do arranjo pré-estabelecido. O Quadro 2 apresenta os artigos selecionados na busca, o título de cada artigo, os autores, o ano de publicação, se foi incluído ou se foi excluído na revisão e a justificativa.

Quadro 2 - Aplicação do Filtro 1: Leitura do resumo, título e palavras-chave

AUTORES	TÍTULO DO ARTIGO	PUBLICATION	INCLUI	EXCLUI	JUSTIFICATIVA
Alessandro Pellis, Mario Malinconico, Alice Guarneri, Lucia Gardossi	Renewable polymers and plastics: Performance beyond the green	2020	X		Apresenta a importância da utilização de um polímero de base biológica, comparando o seu custo de produção e seu desempenho ambiental.
Arnaldo G. Leal-Junior, Carlos Marques, Anselmo Frizera, Member, IEEE, and Maria José Pontes	Dynamic Mechanical Analysis on a PolyMethyl Methacrylate (PMMA) Polymer Optical Fiber	2018		X	Trata da utilização do PMMA para a fabricação de uma POF para sensores e uma caracterização dinâmica do material, o que não é o intuito do presente trabalho.
Arnaldo Leal-Junior, Anselmo Frizera, Carlos Marques, Maria José Pontes	Mechanical properties characterization of polymethyl methacrylate polymer optical fibers after thermal and chemical treatments	2018		X	Apresenta a análise dinâmico-mecânica POFs feitas de PMMA que foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos e químicos, com o intuito de se produzirem sensores.
Benjamin Mohr, Daniel Grothe, Markus Beckers, Gunnar Seide, Thomas Gries, Christian-A. Bunge	Bio Based POF	2016	X		Apresenta as possibilidades e limitações de uma POF de base biológica em reação a uma POF de base PMMA.
Ervin Tri Suryandari, M.A Zulfikar, Rino R. Mukti and M. Nasir	Preparation and Characterization of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA) Fibers by Electrospinning	2019		X	Apresenta a caracterização por eletrospinning de uma POF a base de PMMA, o que não é o tipo de caracterização utilizado no presente trabalho.
Janez Slapnik, Thomas Lucyshyn and Gerald Pinter	Relationships between the Decomposition Behaviour of Renewable Fibres and Their Reinforcing Effect in Composites Processed at High Temperatures	2021	X		Apresenta a relação de uma fibra de origem renovável com seu excelente desempenho mecânico e baixo impacto ambiental. Investiga como diferentes fibras de origem renovável se comportam sob diferentes temperaturas de processamento e correlaciona as propriedades térmicas com as propriedades mecânicas da fibra.
Julian T.M. Pinto, Karen J. Amaral, Susanne Hartard, Paulo R. Janissek, Klaus Helling	Reducing the environmental impacts of vitreous optical fiber production e A Life Cycle Impact Assessment	2017	X		Apresenta a avaliação do impacto do ciclo de vida de uma Fibra Óptica Vítrea e como reduzir os seus impactos ambientais.
Lamis Faaz Nassier, Mohammed Hadi Shinen	Study of the optical properties of poly (methyl methacrylate) (PMMA) by using spin coating method	2022	X		Apresenta a criação de filmes finos de PMMA utilizando 'spin coating process', capaz de detectar a absorção, o coeficiente de absorção e os valores do índice de refração do polímero.
Martin Reimer, Daniel Van Opendenbosch, and Cordt Zollfrank	Fabrication of Cellulose-Based Biopolymer Optical Fibers and Their Theoretical Attenuation Limit	2021	X		Apresenta uma rota de processamento para a obtenção de fibras ópticas de biopolímeros à base de celulose.
Md. Rezaul Rahman, Nur-Azzah Afifah Binti Taib, Muhamad Khusair y Bin Bakri and Siti Noor Linda Taib	Importance of sustainable polymers for modern society and development	2021	X		Apresenta a importância da sustentabilidade dos polímeros para o desenvolvimento da sociedade moderna.
Michel Biron	Environmental Impact of Renewable Plastics: Pros and Cons, Indicators	2017	X		Apresenta indicadores de prós e contras a respeito dos Impactos Ambientais de Plásticos Renováveis.

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a aplicação do primeiro filtro, a amostra de 11 artigos foi reduzida para uma amostra de 8 artigos, resultando na exclusão de 3 artigos por não se aplicarem aos critérios de inclusão preestabelecidos.

O filtro 2 consistiu na leitura da introdução, da conclusão e na aplicação dos critérios de qualificação preestabelecidos dos 8 artigos selecionados, o Quadro 3 mostra o número de artigos definidos no Quadro 2, o título de cada artigo, se o artigo se aplica ou não ao segundo filtro e a justificativa para a exclusão ou inclusão de cada artigo dentro dos critérios de qualificação.

Quadro 3 - Aplicação do Filtro 2: Leitura da Introdução e Conclusão

TÍTULO DO ARTIGO	A	B	C	D	E	JUSTIFICATIVA
Renewable polymers and plastics: Performance beyond the green	X	X		X	X	Apresenta a importância da utilização de um polímero de base biológica, comparando o seu custo de produção e seu desempenho ambiental.
Bio Based POF	X	X	X	X		Apresenta as possibilidades e limitações de uma POF de base biológica em reação a uma POF de base PMMA.
Relationships between the Decomposition Behaviour of Renewable Fibres and Their Reinforcing Effect in Composites Processed at High Temperatures	X	X		X	X	Apresenta a relação de uma fibra de origem renovável com seu excelente desempenho mecânico e baixo impacto ambiental. Investiga como diferentes fibras de origem renovável se comportam sob diferentes temperaturas de processamento e correlaciona as propriedades térmicas com as propriedades mecânicas da fibra.
Reducing the environmental impacts of vitreous optical fiber production e A Life Cycle Impact Assessment	X	X			X	Apresenta a avaliação do impacto do ciclo de vida de uma Fibra Óptica Vítrea e como reduzir os seus impactos ambientais.
Study of the optical properties of poly (methyl methacrylate) (PMMA) by using spin coating method	X	X	X			Apresenta a criação de filmes finos de PMMA utilizando 'spin coating process', capaz de detectar a absorção, o coeficiente de absorção e os valores do índice de refração do polímero.
Fabrication of Cellulose-Based Biopolymer Optical Fibers and Their Theoretical Attenuation Limit	X	X		X		Apresenta uma rota de processamento para a obtenção de fibras ópticas de biopolímeros à base de celulose.
Importance of sustainable polymers for modern society and development	X	X			X	Apresenta a importância da sustentabilidade dos polímeros para o desenvolvimento da sociedade moderna.
Environmental Impact of Renewable Plastics: Pros and Cons, Indicators	X	X			X	Apresenta indicadores de prós e contras a respeito dos Impactos Ambientais de Plásticos Renováveis.

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a aplicação do segundo filtro, a amostra de artigos foi mantida, tendo em vista que os artigos se encaixavam nos critérios estabelecidos para a qualificação.

O filtro 3 consistiu na leitura completa dos 8 artigos que passaram pela aplicação do segundo filtro e após a aplicação dos critérios de qualificação, foram todos mantidos conforme definido na Quadro 4 que apresenta o título de cada artigo, se o artigo se aplica ou não se aplica a pesquisa e a justificativa de inclusão e exclusão de cada artigo.

Quadro 4 - Aplicação do Filtro 3: Leitura completa

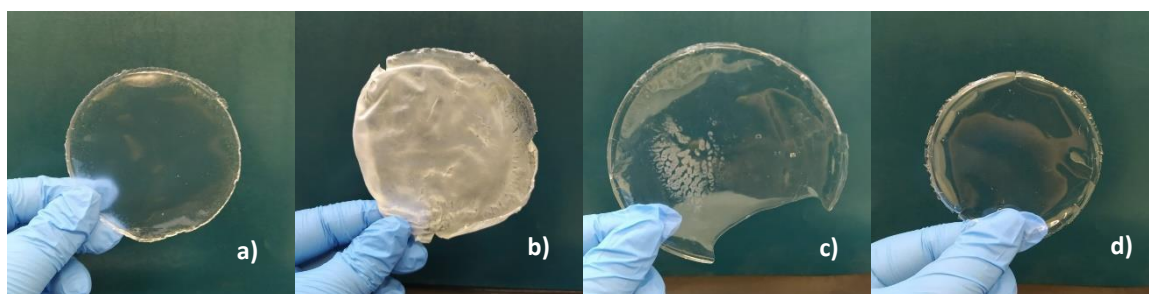
TÍTULO DO ARTIGO	INCLUI	EXCLUI	JUSTIFICATIVA
Renewable polymers and plastics: Performance beyond the green	X		Apresenta a importância da utilização de um polímero de base biológica, comparando o seu custo de produção e seu desempenho ambiental.
Bio Based POF	X		Apresenta as possibilidades e limitações de uma POF de base biológica em reação a uma POF de base PMMA.
Relationships between the Decomposition Behaviour of Renewable Fibres and Their Reinforcing Effect in Composites Processed at High Temperatures	X		Apresenta a relação de uma fibra de origem renovável com seu excelente desempenho mecânico e baixo impacto ambiental. Investiga como diferentes fibras de origem renovável se comportam sob diferentes temperaturas de processamento e correlaciona as propriedades térmicas com as propriedades mecânicas da fibra.
Reducing the environmental impacts of vitreous optical fiber production e A Life Cycle Impact Assessment	X		Apresenta a avaliação do impacto do ciclo de vida de uma Fibra Óptica Vítrea e como reduzir os seus impactos ambientais.
Study of the optical properties of poly (methyl methacrylate) (PMMA) by using spin coating method	X		Apresenta a criação de filmes finos de PMMA utilizando 'spin coating process', capaz de detectar a absorção, o coeficiente de absorção e os valores do índice de refração do polímero.
Fabrication of Cellulose-Based Biopolymer Optical Fibers and Their Theoretical Attenuation Limit	X		Apresenta uma rota de processamento para a obtenção de fibras ópticas de biopolímeros à base de celulose.
Importance of sustainable polymers for modern society and development	X		Apresenta a importância da sustentabilidade dos polímeros para o desenvolvimento da sociedade moderna.
Environmental Impact of Renewable Plastics: Pros and Cons, Indicators	X		Apresenta indicadores de prós e contras a respeito dos Impactos Ambientais de Plásticos Renováveis.

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2. TESTE DE SOLUBILIDADE

Os testes de solubilidade indicaram que o clorofórmio foi o melhor solvente utilizado para se obter as amostras de filmes mais transparentes FOS70 e FOS71, originados do PMMA de fonte fóssil. No caso do PMMA de origem renovável, apenas a amostra REN68 resultou em um filme devidamente transparente usando uma mistura de 25 % de clorofórmio e 75 % de diclorometano como solvente, enquanto a amostra REN69 permaneceu turva, mesmo em sua melhor versão com uma mistura de 50 % de clorofórmio e 50 % de diclorometano, mostrados na Figura 13

Figura 14 - Filmes de PMMA obtidos a partir das amostras de *pellets* (a) REN68, (b) REN69, (c) FOS70 e (d) FOS71.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa configuração inicial levou a filmes pouco transparentes. Desta forma, diferentes proporções de soluto e solvente foram testadas, sendo os melhores resultados apresentados na Tabela 1. Como é possível observar, foi necessário usar uma mistura de solventes para atingir a transparência desejada. Em todos os testes, a homogeneização e a evaporação foram mantidas.

Tabela 1 - Proporções de solventes utilizadas para obter os filmes com a melhor transparência.

PMMA	Clorofórmio (%)	Diclorometano (%)	Filmes obtidos
0.300 g	75	25	REN68
0.300 g	50	50	REN69
0.500 g	100	0	FOS70, FOS71

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3. CRIAÇÃO DAS PRÉ-FORMAS

Os testes com as diferentes proporções de massa, temperatura e tempo apontaram que para as amostras REN68 e REN69, as melhores condições foram com 12 g de amostra, 8 g de sílica à 190 °C por um período de 4h. Para as amostras FOS70 e FOS71 a melhor combinação entre as proporções foi de 14 g de amostra, 6 g de sílica à 210 °C durante 2h. Apresentadas na Tabela 2 juntamente com o nível de fusão das amostras e o nível de borbulhamento que foram medidos de 0 como sendo o menor nível até 5 como o maior.

Tabela 2 - Proporções de massa, temperatura, tempo, nível de fusão e nível de borbulhamento para as amostras REN68, REN69, FOS70 e FOS71.

Amostra	M _{amostra} (g)	M _{sílica} (g)	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Nível de Fusão (0-5)	Nível de Bolhas (0-5)
REN68 REN69	12	8	130	6	1	0
REN 68 REN69	12	8	140	6	2	1
REN68 REN69	12	8	145	6	3	2
REN68 REN69	12	8	165	6	4	3
REN68 REN69	12	8	190	4	5	1
FOS70	7	5	200	8	5	5
FOS70	7	5	200	8	4	5
FOS70	7	2,5	200	10	5	5
FOS70	8	2	190	10	3	4
FOS70	8	2	210	10	5	4
FOS70	8	2	210	13	5	4
FOS70	8	2	210	24	5	4
FOS70	8	6	230	2	5	5
FOS70	8	6	230	4	5	5
FOS70	8	6	230	3	5	5
FOS70	14	6	210	2	5	5
FOS71	8	6	230	4	5	1
FOS71	8	6	220	2	5	0
FOS71	14	6	210	2	5	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

As melhores pré-formas produzidas podem ser observadas na Figura 14.

Figura 15 - Pré-formas produzidas a partir das amostras REN68, REN69, FOS70 e FOS71 respectivamente.

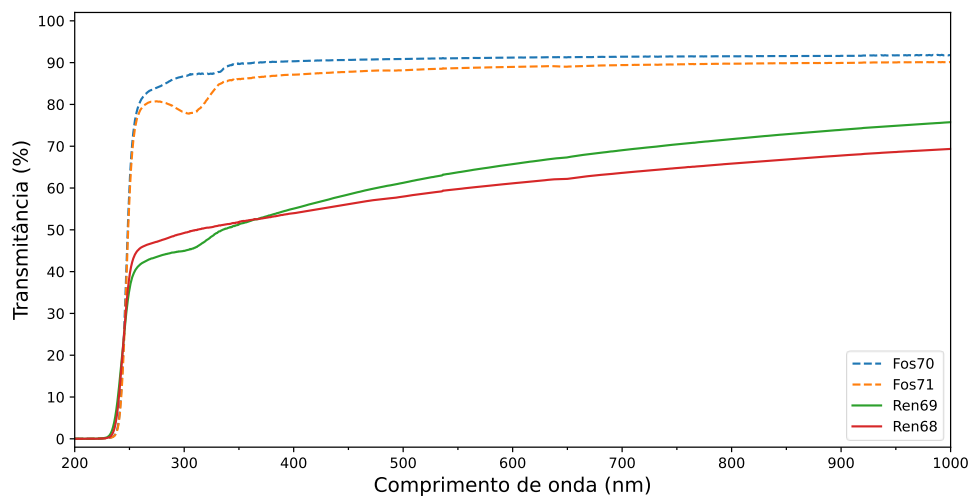


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4. UV-Vis

Para fins de transmissão de dados, a faixa mais adotada para as POFs está no espectro visível entre 450 nm –750 nm (ZUBIA, *et al.*, 2001). Em particular, as janelas de transmissão em torno dos seguintes comprimentos de onda podem ser empregadas: azul (480 nm), verde (520 nm), laranja/amarelo (560-620 nm), e vermelho (650nm). A janela de 650 nm é especialmente importante e será o comprimento de onda explorado neste trabalho. A Figura 15 apresenta os espectros dos filmes obtidos no ultravioleta visível, como pode ser observado, na região de interesse, comprimentos de onda acima de 350 nm, o PMMA de fonte fóssil (FOS71 e FOS70) apresentou espectro mais limpo sem transições eletrônicas e transmitância de 89% e 91%, respectivamente. Isto está de acordo com os valores relatado na literatura (WU, *et al.*, 2018), onde um bastão de PMMA obtido por tratamento térmico, sem solventes, mostra 92% da transmitância na região de interesse (650 nm).

Figura 16 - Espectros Eletrônicos dos filmes de PMMA na Região do Ultravioleta-visível



Fonte: Elaborado pelo autor.

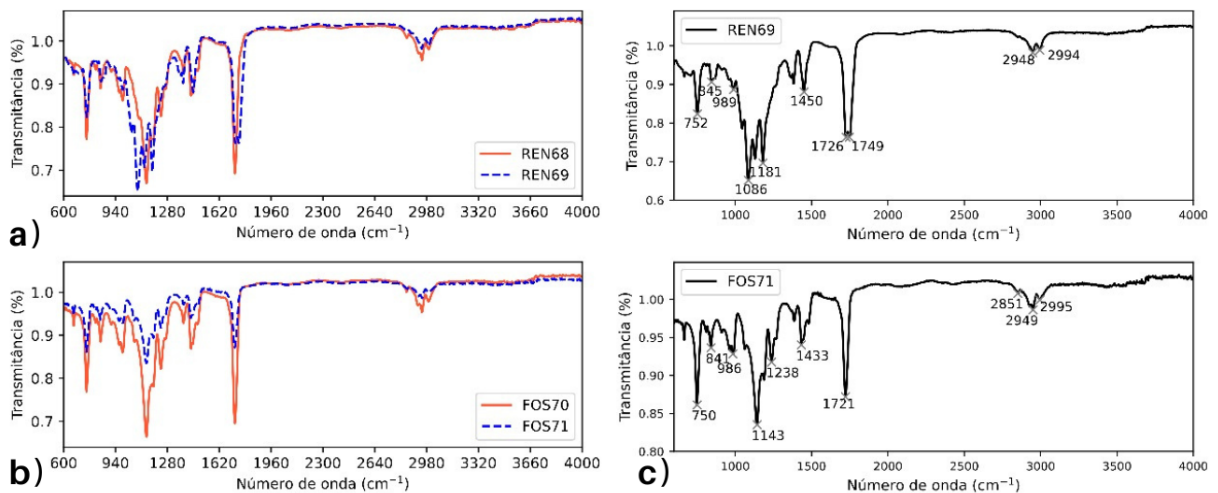
Os filmes de PMMA obtidos a partir das amostras de origem renovável apresentaram transmitância em torno de 60% na região de interesse. Esta discrepância pode ser atribuída à superfície rugosa e opacidade da amostra devido à presença de solvente nos interstícios dos filmes obtidos a partir das amostras de origem renovável, mesmo sendo utilizados solventes em diferentes proporções.

5.5. FTIR

A análise do espectro vibracional na região do infravermelho exibida na Figura 16 não apresentou diferenças perceptíveis entre as duas amostras de origem fóssil. No caso das

amostras de origem renovável é possível observar algumas diferenças entre REN68 e REN69. A amostra REN69 apresenta um segundo pico na região em torno de 1748 cm^{-1} e um deslocamento de bandas em direção a um menor número de onda na região $1000 - 1300\text{ cm}^{-1}$.

Figura 17 - Espectros vibracionais das amostras com (a) fontes renováveis, (b) fontes fósseis e (c) a indicação dos picos para a principal região povoada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os principais picos estão listados na Tabela 4, onde as amostras FOS70, FOS71 e REN68 estão em concordância com os resultados da literatura para PMMA puro, enquanto a amostra REN69 apresenta algumas divergências.

De acordo com a literatura (KIZILDUMAN, *et al.*, 2017; KULEYIN, *et al.*, 2022; PENESCU, *et al.*, 2009; ABDELRAZEK, *et al.*, 2016), o PMMA puro apresenta vibrações características simétricas e assimétricas do estiramento de CH de grupos metil em 2994 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} , e CH de CH_2 próximos a 2952 cm^{-1} . O estiramento representativo do grupo carbonila aparece na região de 1730 cm^{-1} como pode-se observar na Tabela 3. No entanto, o espectro para a amostra REN69 aponta outro estiramento do grupo carbonila em 1748 cm^{-1} , que pode estar relacionado ao estiramento carbonílico proveniente de ácido carboxílico. Segundo ABDELRAZEK, *et al.*, (2016) e CHIENG, *et al.*, (2014) nas regiões de 985 cm^{-1} e 844 cm^{-1} aparecem algumas deformações que são características do PMMA, foram ainda identificadas as deformações características do grupo CH_2 em 754 cm^{-1} .

Tabela 3 - Atribuição FTIR para as amostras e comparação com os dados reportados na literatura.

Vibração	REN68 (cm ⁻¹)	REN69 (cm ⁻¹)	FOS70 (cm ⁻¹)	FOS71 (cm ⁻¹)	Literatura PMMA puro (cm ⁻¹)
$\nu_{as}(\text{C-H}) - \text{CH}_3$	2994	2994	2994	2995	2994
$\nu_{as}(\text{C-H}) - \text{CH}_2$	2950	2948	2950	2949	2950
$\nu_s(\text{C-H}) - \text{CH}_3$	2850	no	2850	2851	2849
$\nu(\text{C=O})$	1723	1726 1749	1723	1721	1722
PMMA	987	989	987	986	985
PMMA	842	842	842	841	844
$\rho(\text{C-H}) - \text{CH}_2$	750	752	750	750	754

* no = não observado

Fonte: Elaborado pelo autor.

A sobreposição de bandas vibracionais tem sido relatada em estudos de misturas poliméricas como consequência do aumento da perda percentual de peso de acordo com as temperaturas, provavelmente devido a algum aditivo na matriz polimérica (PAL; KHARE, 2013).

Outra observação relacionada à amostra REN69 é o deslocamento das frequências absolutas para números de ondas mais baixos e alargamento de banda quando comparados aos espectros de material puro. Tais fenômenos podem ser atribuídos à mudança na taticidade, ou seja, na forma como as unidades repetitivas se dispõem na cadeia polimérica e na geometria nas estruturas de mistura. A incorporação de outro polímero no sistema produz mudanças espectroscópicas em relação ao espectro de material puro, e a extensão dessas mudanças varia de sistema para sistema em função da natureza do polímero e do seu conteúdo na mistura.

5.6. TGA/TGD

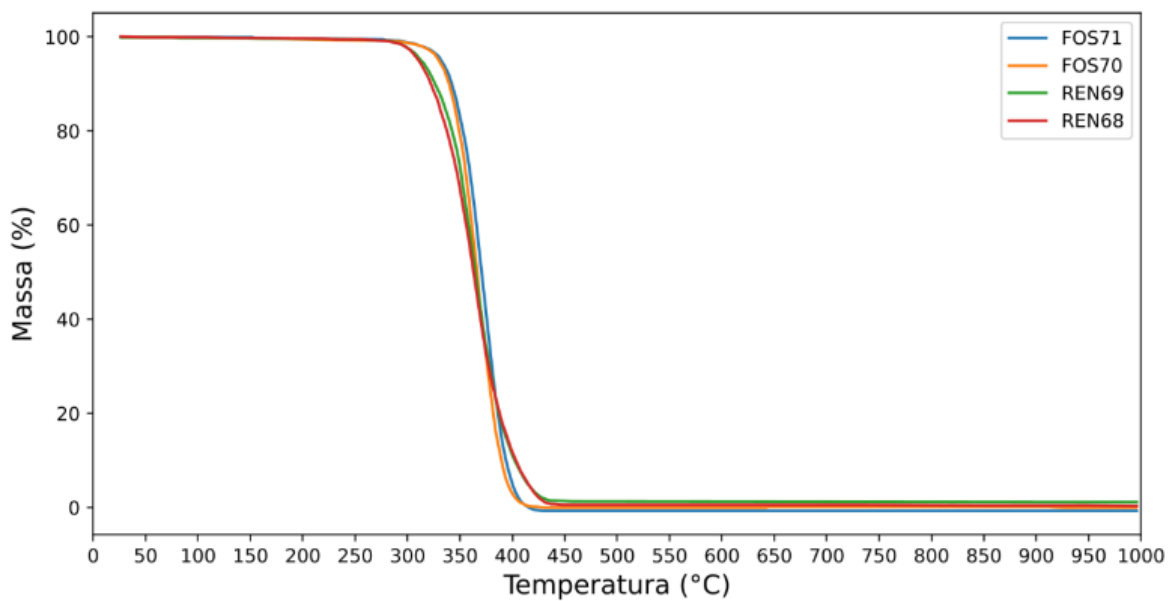
A partir da análise termogravimétrica é possível observar o comportamento da decomposição térmica do polímero. Na Figura 17 é possível observar o perfil das quatro amostras.

A amostra REN68 e a amostra FOS70 apresentaram uma primeira perda de massa de 0,635 % e 1,58 % em torno de 266 °C e 314 °C respectivamente. Posteriormente, a maior parte da massa foi perdida em T_{onset} e T_{endset} , conforme pode ser visto na Tabela 4. Para as amostras

REN69 e FOS71 foi possível identificar somente uma perda de massa com o início e o final nas temperaturas exibidas na Tabela 5.

Para que se fosse possível comparar os resultados com valores da literatura, foram também levantados os pontos $T_{50\%}$, que correspondem à temperatura em que a amostra perdeu 50 % da sua massa.

Figura 18 - Curvas de TGA para todas as amostras obtidas de origem fóssil e renovável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Temperaturas em que ocorreram as principais perdas de massa.

Amostra	% massa	T_{onset} (°C)	T_{endset} (°C)	($T_{50\%}$ °C)
REN68	98,87	329	396	363
REN69	98,42	334	395	364
FOS70	97,29	342	390	366
FOS71	99,82	344	397	370

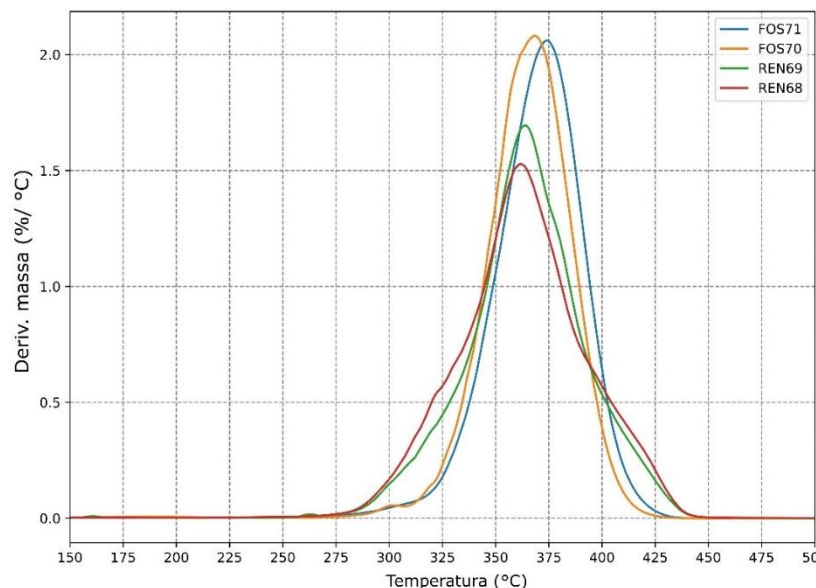
Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico da Figura 18 mostra a sobreposição das curvas das derivadas da perda de massa, onde pode-se notar que na amostra REN68 aparece um ombro na região de 321 °C que pode estar relacionado a um processo de decomposição secundária ou a transições que ocorrem simultaneamente com os principais eventos de decomposição, nos levando a acreditar que a amostra apresenta algum outro material em sua composição.

As outras duas amostras apresentam pequenos sinais em 262 °C para REN69 e em 299 °C para FOS70, sendo um indicativo de que existe mais de um processo de decomposição ocorrendo ao mesmo tempo, entretanto com velocidades diferentes.

O PMMA puro apresenta uma decomposição térmica baseada na cadeia polimérica que ocorre entre 303 °C – 420 °C (KUMAR, *et al.*, 2018), colocando assim os materiais avaliados em conformidade com a literatura. Este alargamento da faixa de temperatura, combinado com os resultados observados para as demais técnicas apresentadas, nos leva a pensar que essas amostras na verdade, se tratam de uma blenda polimérica. De maneira geral, pode-se perceber que as amostras de origem renovável apresentam picos mais alargados do que as amostras de origem fóssil.

Figura 19 - Curvas das derivadas da perda de massa para cada amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

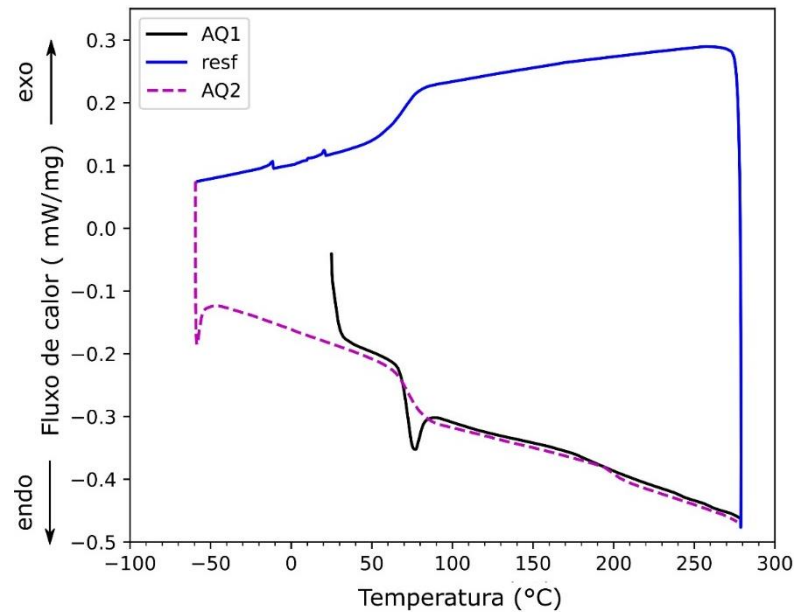
5.7. DSC

Na Figura 19, é possível observar o gráfico completo para o estudo de DSC da amostra REN68, onde o primeiro aquecimento da amostra foi da temperatura ambiente até 280 °C e está representado pelo traço preto, sendo possível observar um pico endotérmico na região de 75 °C correspondente à uma relaxação molecular. Segundo Canevarolo (2017), este fenômeno ocorre devido a um acúmulo de tensões na amostra que são resultantes do processamento, tratamento

ou história térmica do material. Este é um fenômeno irreversível que desaparece durante o segundo aquecimento, que está apresentado pela linha tracejada violeta.

Desta forma, a temperatura de transição vítrea (T_g) deve ser determinada a partir da curva do segundo aquecimento.

Figura 20 - Curvas de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para a amostra REN68.



Fonte: Elaborado pelo autor.

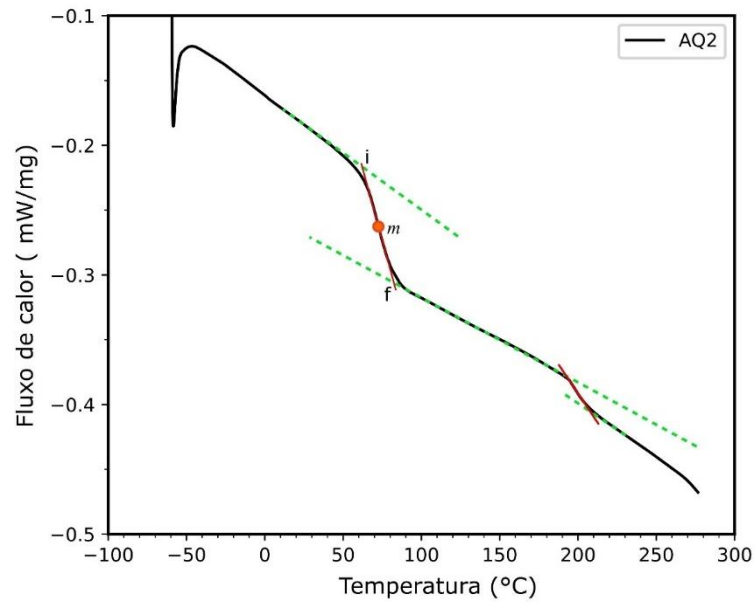
Na Figura 20 pode ser vista apenas a curva referente ao segundo aquecimento da amostra, bem como as linhas utilizadas na determinação da T_g da amostra.

Os pontos *i* (*onset*) e *f* (*endset*) definem a faixa de temperatura em que ocorre a transição. O ponto médio *m* é obtido a partir do valor médio da variação do fluxo de calor entre os pontos *i* e *f*, sendo citado como a T_g do material.

No caso da amostra REN68, foi possível identificar duas mudanças na linha de base. A primeira aconteceu entre 62,90 °C e 81,45 °C, com $m = 71,77$ °C e a segunda entre 192,74 °C e 207,26 °C com $m = 200$ °C. Este é um forte indicativo de que o polímero em estudo pode ter sido dopado.

Como nos resultados anteriores, os valores obtidos para as amostras de fonte renovável são ligeiramente diferentes daqueles relatados em outros estudos para PMMA puro (KUMAR, *et al.*, 2018; FATEH, *et al.*, 2016; GAUR, *et al.*, 2008), especialmente na faixa entre 99 °C – 114 °C. De acordo com Foroughi-Dahr *et al.*, (2017) a inserção de agentes plastificantes provoca uma diminuição na T_g dos polímeros.

Figura 21 – Curva referente ao segundo aquecimento da amostra REN68.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5 mostra os valores encontrados para as demais amostras em estudo a partir da Figura 21, que apresenta as curvas ampliadas referentes ao segundo aquecimento de cada uma delas.

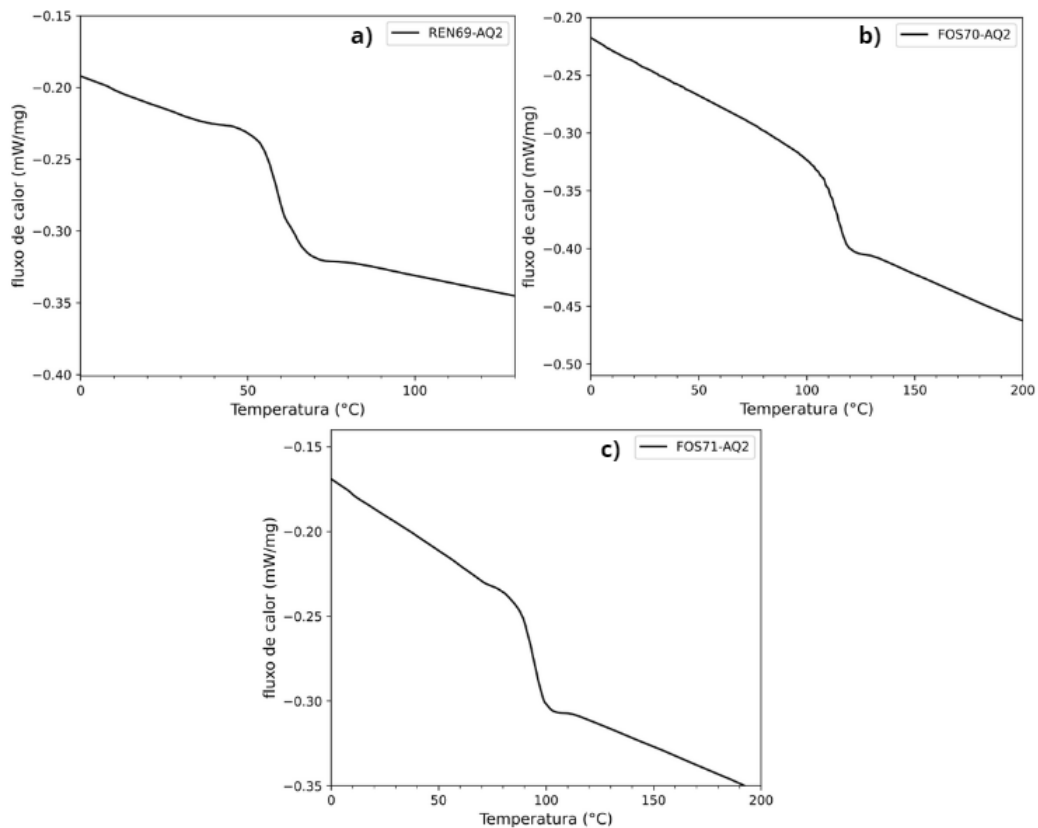
Tabela 5 - Valores encontrados para as amostras em estudo.

Amostra	<i>i</i> (°C)	<i>f</i> (°C)	<i>m</i> (°C)	<i>i</i> (°C)	<i>f</i> (°C)	<i>m</i> (°C)
REN68	62,90	81,45	71,77	192,74	207,26	200,00
REN69	53,44	68,02	60,73	no	no	no
FOS70	104,84	118,55	112,10	no	no	no
FOS71	87,90	99,19	93,54	no	no	no

*no = não observado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Curvas ampliadas referentes ao segundo aquecimento para (a) REN69, (b) FOS70 e (c) FOS71.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.8. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DA BIODEGRADABILIDADE

Com a realização do teste de biodegradação em um período de 30 dias, foi possível observar que a partir da primeira adição de água nas amostras, elas apresentaram um aumento em sua massa, podendo esse aumento ser causado pela absorção da água pelas amostras.

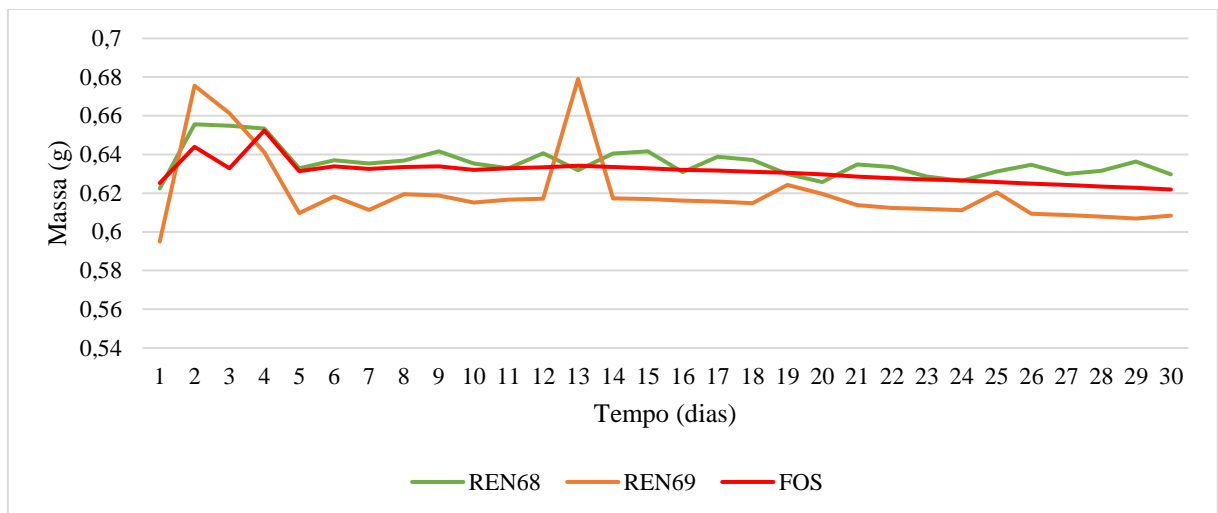
A partir dos resultados das pesagens apresentados na Figura 22 e na Figura 23, é possível observar que durante o período de análise, mesmo com a adição de 2 mL de água diariamente, as amostras foram perdendo relativamente apenas a massa que haviam ganho após a primeira adição de água. Em especial, a amostra REN69 em formato de *pellets* apresentou uma perda de

massa maior em relação as outras amostras, enquanto a amostra FOS nos dois tipos, lâminas e *pellets*, obteve uma maior constância em seus valores, tendo uma perda insignificante de massa.

Com essas observações, é possível entender que com um período maior de análise, as amostras começariam a perder suas massas iniciais, onde nessas proporções as amostras de origem renovável se sobressaiam em relação a amostra de origem fóssil.

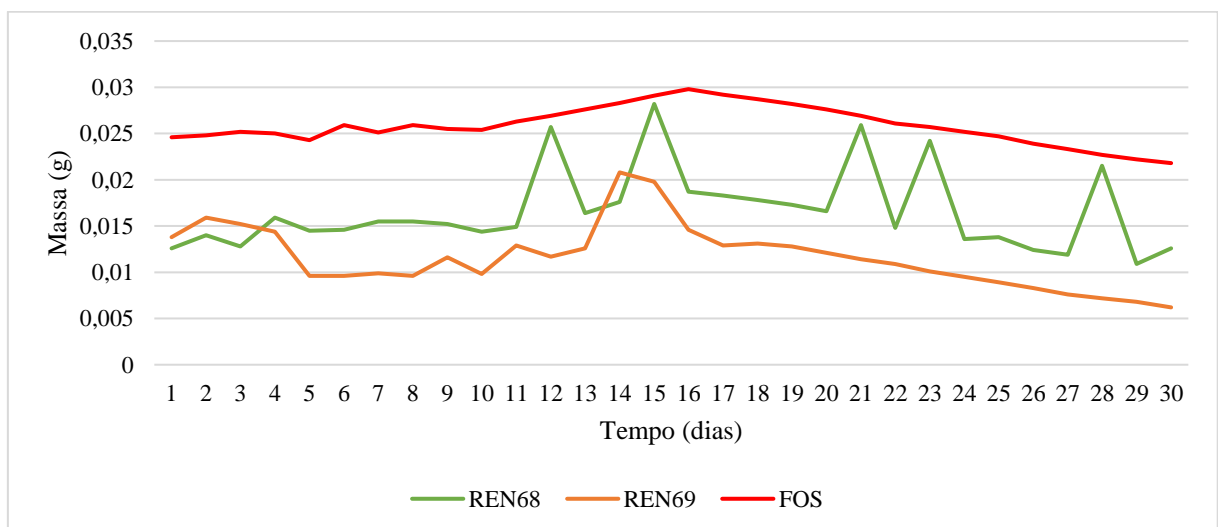
Tendo como base essas informações, o estudo de ângulo de contato foi realizado para comprovar se possivelmente as amostras estariam absorvendo a água adicionada.

Figura 23 - Proporção de perda de massa (g) em função dos dias para as amostras de lâminas de PMMA



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 - Proporção de perda de massa (g) em função dos dias para as amostras de *pellets* de PMMA



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.9. ÂNGULO DE CONTATO

Com os resultados obtidos através desta análise, pode-se afirmar que as amostras REN68, REN69 e FOS apresentaram comportamento hidrofílico com um ângulo de contato $< 90^\circ$, ou seja, elas têm uma compatibilidade com o umedecimento, podendo justificar a absorção da água pelas lâminas e *pellets* utilizados no teste de biodegradação (ANGLÈS, *et al.*, 2000).

Os valores médios das medidas de ângulo de contato para cada amostra, de cada lado, foram representados na Tabela 6.

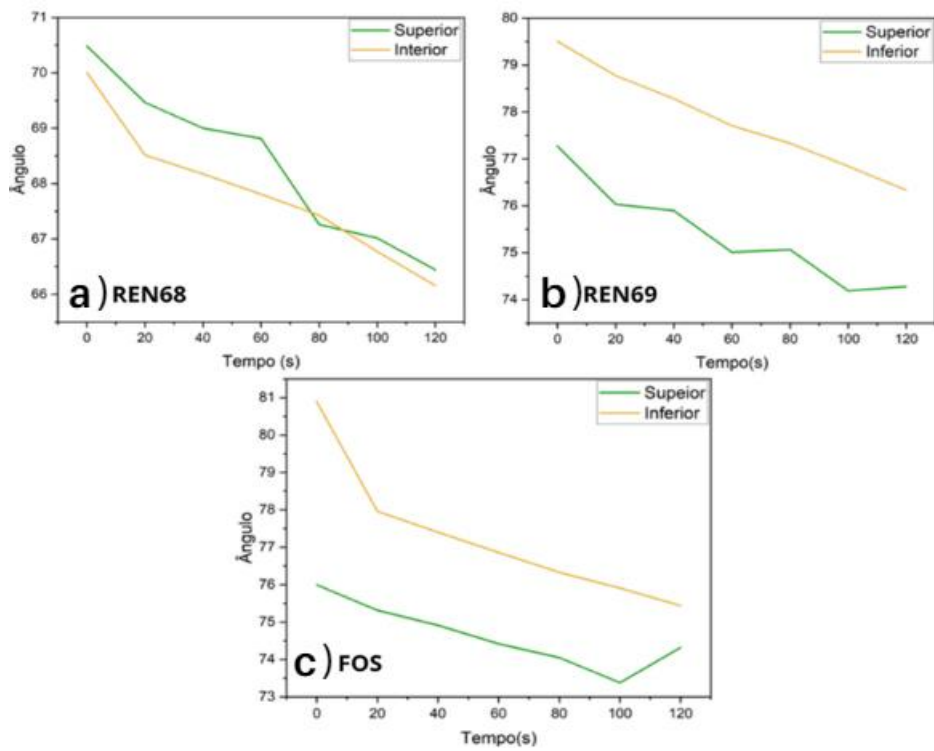
Tabela 6 - Valores médios para as medidas de ângulo de contato.

Amostra	Ângulo no início da medida ($^\circ$)	Ângulo no final da medida ($^\circ$)
Lado superior		
REN68	70,48	66,44
REN69	77,24	74,27
FOS	75,99	74,31
Lado inferior		
REN68	70,00	66,15
REN69	79,50	76,33
FOS	80,90	75,43

Fonte: Elaborado pelo autor.

A diminuição dos ângulos de contato medidos ao longo de 120 segundos, corrobora a característica de absorção de água exibida pelas amostras, e pode ser observada na Figura 24.

Figura 25 - Diminuição gradativa dos valores de ângulo de contato para as amostras (a) REN68, (b) REN69 e (c) FOS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos por meio da RBS, indica-se que o tema da pesquisa representa uma lacuna dentro da área de telecomunicações, por causa do pequeno número de artigos encontrados evidência a necessidade de estudos que possam avaliar a utilização de biopolímeros para a fabricação de fibras ópticas.

Os testes de solubilidade dos *pellets* de origem renovável não indicaram resultados favoráveis para a produção de filmes. Mesmo sendo utilizadas diversas combinações de solventes para a dissolução, os filmes das amostras apresentaram turbidez e rugosidade.

Por outro lado, estas amostras de origem renovável apresentaram as mesmas características estruturais que as amostras de origem fóssil FOS70 e FOS71. A similaridade foi identificada pelas análises espectroscópicas no UV-vis e FTIR, além das temperaturas de transição vítrea dos materiais se mostrarem em conformidade com as temperaturas relatadas na literatura, apesar da amostra REN69 ter apresentado algumas bandas deslocadas na análise de FTIR. Assim, apesar das diferenças encontradas indicarem que o material proposto não se trata somente de PMMA puro, a ausência de transições eletrônicas na região de interesse no UV-vis indica potencial uso do material como guia de onda para fibras ópticas.

A calorimetria exploratória diferencial para as amostras de PMMA de origem renovável revelou uma temperatura de transição vítrea menor do que a relatada na literatura. Esta diferença pode estar relacionada a adição de plastificantes muito usados para a fabricação de revestimentos. No caso da amostra REN68, foi possível identificar duas mudanças na linha de base, o que pode ser um indício de que esta amostra foi dopada.

Já a termogravimetria revelou que as amostras de origem renovável indicaram a ocorrência simultânea de mais de uma reação de decomposição com velocidades diferentes, concluindo que há a presença de mais de um material. No caso das amostras REN69 e FOS70, foi possível identificar sinais adicionais, o que pode ser um indício de que estas amostras foram dopadas. Ainda na amostra REN68 aparece um ombro na região de 321 °C que pode estar relacionado a um processo de decomposição secundária.

Em relação ao teste de biodegradação, conclui-se que as amostras inicialmente aumentaram de massa devido à absorção de água. Contudo, com o passar do tempo, perderam essa massa adicional. A amostra REN69 em forma de *pellets* apresentou a maior redução de massa, e, portanto, menor tempo de biodegradação. Por outro lado, a perda de massa da amostra FOS foi quase imperceptível. Estes resultados experimentais indicam maior potencial de desempenho ambiental das amostras renováveis, uma vez que apresentam condições mais

propícias à circularidade. A capacidade de interação da água com a superfície das amostras foi compreendida com a análise do ângulo de contato, onde foi concluído que as amostras são hidrofílicas.

Este trabalho trouxe contribuições teóricas que avançaram na fronteira do conhecimento sobre a aplicação de biopolímeros para o setor de telecomunicações. Ainda há lacunas a serem preenchidas, mas os resultados deste trabalho sugerem contribuições práticas para os projetos e sistemas de telecomunicações avançarem rumo aos ODS e à Economia Circular.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAZEK, E. M.; HEZMA, A. M.; EL-KHODARY, A.; ELZAYAT, A. M. Spectroscopic studies and thermal properties of PCL/PMMA biopolymer blend. **Egyptian Journal of basic and applied sciences**, Egito, v. 3, p. 10–15, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2015.06.001>. Acesso em: 14 mar. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO 14040**: Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- AGRAWAL, G. **Fiber-optic communication systems**. Rochester: A John Wiley & Sons, INC., 2010. *E-book*. Acesso em: 13 abr. 2023.
- ALEXANDRIS, G. M.; VAGIONAS, C.; TSAKIRIDIS, A. Hybrid photonic integrated circuits for neuromorphic computing. **Optical materials express**, Washington, v. 13, p. 3553-3606, 2023. Disponível em: <https://opg.optica.org/ome/fulltext.cfm?uri=ome-13-12-3553&id=542874>. Acesso em: 13 abr. 2023.
- ANGLES, M. N.; DUFRESNE, A. Plasticized starch/tunicin whiskers nanocomposites. **Structural analysis macromolecules**, Grenoble, n. 33, p. 8344–8353, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/216090129_Plasticized_StarchTunicin_Whiskers_Nanocomposites_1_Structural_Analysis. Acesso em: 25 jan. 2023.
- BAO, H.; WU, B.; LIU, Y.; ZHOU, Y.; ZHENG, J. Investigation of long period grating imprinted on a plastic optical fiber for liquid level sensing. **Optik**, Berlim, v. 251, 2022. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022Optik.25168367B/abstract>. Acesso em: 19 jan. 2023.
- BARANWAL, J.; BARSE, B.; FAIS, A.; DELOGU, G. L.; KUMAR, A. Biopolymer: a sustainable material for food and medical applications. **Polymers MDPI**, Nova Déli, v. 14, n. 5, p. 983, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/5/983>. Acesso em: 13 abr. 2023.
- BHOWMIK, K.; PENG, G-D. **Polymer optical fibers**. Singapura: Springer Nature, 2019.
- BILAL, M.; IQBAL, H. M. N. Naturally-derived biopolymers: potential platforms for enzyme immobilization. **International journal of biological macromolecules**, Guildford, v. 130, p. 462-482, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30825566/>. Acesso em: 13 abr. 2023.
- BONEFACINO, J.; GHASHGHAIE, S.; ZHENG, T.; LIN, C-P.; ZHENG, W.; BLANQUER, L. A.; HUANG, J.; GERVILLIÉ, C.; TAM, H-Y. High-fidelity strain and temperature measurements of Li-Ion batteries using polymer optical fiber sensors. **Journal of the electrochemical society**, New York, v. 169, n. 10, p. 100-108, 2022. Disponível em: https://hal.science/hal04104135v1/file/Bonefacino_2022_J._Electrochem._Soc._169_100508.pdf. Acesso em: 18 nov. 2022.

BRASIL. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: Organização das nações unidas, [2000]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.

BRITO, G. F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO, E. M.; MÉLO, T. J. A. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista eletrônica de materiais e processos**, Campina Grande, v. 6, p. 127–139, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289427889_Biopolimeros_polimeros_biodegradaveis_e_polimeros_verdes. Acesso em: 13 abr. 2023.

CANEVAROLO JR, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2017.

CENNAMO, N.; ARCADIO, F.; ZENI, L.; ALBERTI, G.; PESAVENTO, M. Optical-chemical sensors based on plasmonic phenomena modulated via micro-holes in plastic optical fibers filled by molecularly imprinted polymers. **Sensors and actuators b chemical**, Lausanne, v. 372, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925400522013156?via%3Dihub>. Acesso em: 19 out. 2022.

CHIENG, B. W.; IBRAHIM, N. A.; YUNUS, W. M. Z. W.; HUSSEIN, M. Z. Poly(lactic acid)/poly(ethylene glycol) polymer nanocomposites: effects of graphene nanoplatelets. **Polymers** (Basel), Selangor, v. 6, n. 1 p. 93–104, 2014. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/6/1/93>. Acesso em: 23 set. 2022.

FARDIM, K.; PRADO, A. R.; BORGES, A dos S.; CANI, S. P. N. Aproveitamento do resíduo PMMA no desenvolvimento de dispositivos ópticos utilizados em sistemas de telecomunicações baseados em fibras ópticas plásticas. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 6., 2018, Bento Gonçalves. **Anais meio ambiente, sustentabilidade & tecnologia**, Belo Horizonte: Poisson, 2021. Disponível em: https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=185&ano=_sexto. Acesso em: 30 nov. 2022.

FATEH, T.; RICHARD, F.; ROGAUME, T.; JOSEPH, P. Experimental and modelling studies on the kinetics and mechanisms of thermal degradation of polymethyl methacrylate in nitrogen and air. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, Holanda, v. 120, p. 423–433, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2016.06.014>. Acesso em: 13 abr. 2023.

FOROUGHI-DAHR, M.; MOSTOUFI, N.; SOTUDEH-GHAREBAGH, R. Particle coating in fluidized beds. **Reference module in chemistry, molecular sciences and chemical engineering**. Canada: Elsevier INC, 2017. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5842338/mod_resource/content/1/Particle%20coating%20in%20fluidized%20bed.pdf. Acesso em: 09 mai. 2023.

GAUR, V. K.; GAUTAM, K.; SHARMA, P.; GUPTA, S.; PANDEY, A.; YOU, S., & VARJANI, S. **Carbon based catalyst for environmental bioremediation and sustainability**: updates and perspectives on techno-economics and life cycle assessment. **Environmental research**, Barcelona, v. 209, 2022. Disponível em: <https://eprints.gla.ac.uk/263750/2/263750.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2023.

GAUR, M. S.; SHUKLA, P.; TIWARI, R. K.; TANWAR, A.; SINGH, S. P. New approach for the measurement of glass transition temperature of polymer. **Indian j pure & appl phys**, Índia, v. 46, n. 8, p. 540–544, 2008. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/233753759_New_Approach_for_the_measurement_of_Glass_Transition_Temperature_of_a_Polymer. Acesso em: 18 abr. 2023.

GORPINATH, G.; AYVASAMY, S.; SHANMUGARAJ, P.; SWAMINATHAN, R.; SUBBIAH, K.; KANDASAMY, S. **Effects of biopolymers in energy storage applications: a state-of-the-art review**. **Journal of energy storage**, Lérida, v. 70, 2023. Disponível em:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023JEnSt..7008065G/abstract>. Acesso em: 27 mar. 2023.

INOUE, A.; KOIKE, Y. Unconventional plastic optical fiber design for very short multimode fiber link. **Optics express**, Japão, v. 27, n. 9, p. 12061-12069, 3019. Disponível em:

<https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-27-9-12061&id=409053>. Acesso em: 19 mar. 2023.

KARAM, K. F. A mulher na agricultura orgânica e em novas ruralidades. **Estudos feministas**, Florianópolis, v. 12, n. 1, p. 303-320, 2004. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ref/a/TtGn767X6Cky3NJqBgxThbT/>. Acesso em: 16 abr. 2023.

KIRON, D.; KRUSCHWITZ, N.; HAANAES, K.; REEVE, S. M.; GOH, E. The Innovation Bottom Line: how companies that see sustainability as both a necessity and an opportunity, and change their business models in response, are finding success. **MIT sloan management review**, Massachusetts, v. 54, p. 1–22, 2013. Disponível em:

<https://www.stakeholderconsulting.com/wp-content/uploads/2013/02/MITSMR-BCG-Sustainability-Report-20131.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2023.

KIZILDUMAN, B. K.; ALKAN, M.; DOĞAN, M.; TURHAN, Y. Al-Pillared-Montmorillonite (AlPMt)/Poly(Methyl Methacrylate)(PMMA) nanocomposites: the effects of solvent types and synthesis methods. **Advances in materials science and engineering**, Washington, v. 17, n. 3, p. 5–23, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/adms-2017-0012>. Acesso em: 08 out. 2022.

KOIKE, Y.; KOIKE, K. Progress in low-loss and high-bandwidth plastic optical fibers.

Polymer science part b: polymer physics, New York, v. 49, p. 2-17, 2010. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/polb.22170>. Acesso em: 13 set. 2022.

KOIKE, Y.; ASAI, M. The future of plastic optical fiber. **NPG Asia materials**, Asia, v. 1, p. 22-28, 2009. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/am200924>. Acesso em: 22 abr. 2023.

KULEYIN, H.; GÜMRÜK, R.; ÇALIŞKAN, S. The effect of ABS fraction on the fatigue behavior of PMMA/ABS polymer blends. **Materials today communications**, Bristol, v. 33, p. 104-139, 2010. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/362387824_The_Effect_of_ABS_Fraction_on_the_Fatigue_Behavior_of_PMMAABS_Polymer_Blends. Acesso em: 25 nov. 2022.

KUMAR, M.; CHAKRABORTY, S.; UPADHYAYA, P.; PUGAZHENTHI, G. Morphological, mechanical, and thermal features of PMMA nanocomposites containing two-dimensional Co–Al layered double hydroxide. **Journal of applied polymer science**, Washington, v. 135, n. 5,

p. 1–11, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.45774>. Acesso em: 23 out. 2022.

LOZANO, R., HUISINGH, D. Inter-linking issues, and dimensions in sustainability reporting. **Journal of cleaner production**, Xangai, v. 19, n. 2, p. 99–107, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.004>. Acesso em: 17 dez. 2022.

MALI, C.; AAMETA, P. Mapping of trends toward sustainability in network churning. *In*: IEEE WORLD CONFERENCE ON SMART TRENDS IN SYSTEMS, SECURITY AND SUSTAINABILITY, 2, 2018, Londres. **Anais IEEE xplore**, Londres: IEEE, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330584898_Mapping_of_Trends_Toward_Sustainability_in_Network_Churning. Acesso em: 13 abr. 2023.

MARAVEAS, C. Production of sustainable and biodegradable polymers from agricultural waste. **Polymers**, Patra, v. 12, n. 5, p. 1127, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/5/1127>. Acesso em: 18 fev. 2023.

McDEVITT, J. P.; CRIDDLE, C. S.; MORSE, M.; HALE, R. C.; BOTT, C. B.; ROCHMAN, C. M. Addressing the issue of microplastics in the wake of the microbead-free waters act—a new standard can facilitate improved policy. **Environmental science & technology**, Estados Unidos, v. 51, n. 12, p. 6611–6617, 2017. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b05812>. Acesso em: 14 mar. 2023.

MOHANTY, S.; MOREIRA, C. A. Sustainability in global telecommunications. **IEEE potentials**, Canadá, v. 3, n. 5, p. 29–34, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265416845_Sustainability_in_Global_Telecommunications. Acesso em: 13 abr. 2023.

OGLAH, M.H. Estimate the Attenuation and Simulation of dispersion Gaussian pulses propagation in a single mode optical fiber. **Tikrit journal of pure science**, Tikrit, v. 22, n. 6, 2017. Disponível em: <https://tjps.tu.edu.iq/index.php/tjps/article/view/798>. Acesso em: 22 nov. 2022.

OLIVEIRA, J. A.; EWALD, M. R. **Sistemas de gestão ambiental como auxílio para processos industriais limpos**. São Paulo: Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236633408_Sistemas_de_gestao_ambiental_como_auxilio_para_processos_industriais_limpos. Acesso em: 15 jun. 2023.

OTONI, C. G.; AVENA-BUSTILLOS, R. J.; AZEREDO, H. M. C.; LOREVICE, M. V.; MOURA, M. R.; MATTOSO, L. H. C.; McHAUGH, T. H. Recent advances on edible films based on fruits and vegetables - a review. **Comprehensive reviewa in food science and food safety**, Estados Unidos, v. 16, n. 5, p. 1151-1169, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33371612/>. Acesso em: 23 mar. 2023.

PAL, A.; KHARE, P. K. Electrical conductivity behaviour of pure and polyblends samples of polyvinyl chloride (PVC) and polymethyl methacrylate (PMMA). **Journal of Electrostatic**, Ontario, v. 7, n. 6, p. 976–986, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2013.09.005>. Acesso em: 17 fev. 2023.

PELLIS, A.; MALINCONICO, M.; GUARNERI, A.; GARDOSI, L. Renewable polymers and plastics: performance beyond the green. **New biotechnology**, Estados Unidos, v. 60, p. 146-158, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33068793/>. Acesso em: 24 out. 2022.

PENESCU, M. **Diffusion of cyclic versus linear poly (Oxyethylene) oligomers in Poly (Methyl Methacrylate) by ATR - FTIR spectroscopy**. Dissertation (Doctorate in Philosophy) - School of Chemistry and Biochemistry, Georgia Institute of Technology, Georgia, 2009. Disponível em: <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/03143273-588d-4916-a112-b5cc6f2fa613/content>. Acesso em: 15 set. 2022.

RASHED, A. N. Z.; MOHAMED, A. E-N. A. E. G.; HANAFY, S. A. E. R. S. H.; ALY, M. H. A comparative study of the performance of graded index perfluorinated plastic and alumino silicate optical fibers in internal optical interconnections. **Optik**, Jena, v. 127, n. 20, p. 9259–9263, 1 out. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304778961_A_Comparative_Study_of_the_Performance_of_Graded_Index_Perfluorinated_Plastic_and_Alumino_Silicate_Optical_Fibers_in_Internal_Optical_Interconnections. Acesso em: 25 fev. 2023.

RAUSCHENBACH, K. A.; HALL, K. L.; LIVAS, J. C.; RAYBON, G. Four-wave mixing in a fiber loop mirror constructed from two polarization-maintaining dispersion-shifted fibers. **IEEE photon. technol**, Southampton, v. 184, p. 277-282, 1994. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030401800009172>. Acesso em: 14 mai. 2023.

RODRIGUES, M.; PINHO, P. Plastic Optical Fibers in Access Networks. **Procedia technology**, Aveiro, v. 17, p. 601–607, mar. 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275539262_Plastic_Optical_Fibers_in_Access_Networks. Acesso em: 14 jun. 2023.

SAFARLOO, S.; NUÑEZ-CASCAJERO, A.; SANCHEZ-GOMEZ, R.; VÁZQUEZ, C. **Polymer optical fiber plantar pressure sensors: design and validation**. **Sensors**, Suíça, v. 22, n. 10, p. 3883, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/10/3883>. Acesso em: 25 fev. 2023.

SAKAMOTO, T., FURAMI, F., KIKUCHI, K. Bulletin of the research laboratory for nuclear reactors. **IEEE photon. technol**, Japão, v. 31, n. 1, p. 1-137, 2001. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/20494396>. Acesso em: 12 set. 2022.

SARANTI, T. F. S.; MELO, P. T. S.; CERQUEIRA, M. A.; AOUADA, F. A.; MOURA, M. R. Performance of gelatin films reinforced with cloisite Na⁺ and black pepper essential oil loaded nanoemulsion. **Polymers**, Braga, v. 13, p. 4298. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/24/4298>. Acesso em: 15 out. 2022.

SILVEIRA, M. A. Strategic management of innovation towards sustainable development of Brazilian electronics industry. **J technol manag innov.**, Brasília, v. 8, p. 174-183, 2013. Disponível em: <https://www.jotmi.org/index.php/GT/article/view/1185>. Acesso em: 26 nov. 2022.

SOHRABTASH, J.; ZARIFKAR, A.; SHEIKHI, M. H. Tópicos Avançados. **Opto-electron**, Washington, v. 10, p. 430, 2014. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119737391.ch12>. Acesso em: 25 out. 2022.

SOUZA, F. R. A.; OLIVEIRA, J. S. T.; SILVA, D. P.; OLIVEIRA, M. G.; NEVES, D. D.; SILVA, W. E.; STAMFORD, T. C. M. Biopolímeros na indústria de alimentos: do aproveitamento de resíduos agroindustriais a produção de biopolímeros. **Avanços em ciência e tecnologia de alimentos**, Pernambuco, n. 4, p. 370-388, 2021. Disponível em:

<https://downloads.editoracientifica.org/articles/210303531.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.

STOICA, M.; STOICA, D.; IVAN, A.; BAL, C. M. **Biopolymers: regulatory and legislative issues**. Cham: Springer, 2022. (Biopolymers).

SUN, Y.; BAI, Y.; YANG, W.; BU, K.; TANVEER, S.; HAI, J. Global trends in natural biopolymers in the 21st century: a scientometric review. **Front. chem.**, Tehran, v. 10, 2022. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2022.915648/full>.

Acesso em: 25 fev. 2023.

TAKHUR, V. K., THAKUR, M. K. **Functional biopolymers**. Índia: Springer International Publishing AG, 2018.

VALINEJAD, F.; RAHMANI, D. Sustainability risk management in the supply chain of telecommunication companies: a case study. **Journal of cleaner production**, Xangai, v. 203, p. 53–67, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.174>. Acesso em: 19 set. 2022.

WASEEM, M.; LÓPEZ, A.; CARRO, P. L.; LOSADA, M. A. Radio over plastic optical fiber transmission for short-range future networks. *In*: GLOBAL CONFERENCE ON WIRELESS AND OPTICAL TECHNOLOGIES (GCWOT), Malaga, 2022. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/360659691_Radio_Over_Plastic_Optical_Fiber_Transmission_for_Short-Range_Future_Networks. Acesso em: 14 fev. 2023.

WU, J.; GUO, S.; HUANG, H.; LIU, W.; XIANG, Y. Information and communications technologies for sustainable development goals: State-of-the-art, needs and perspectives.

IEEE communications surveys & tutorials, Canadá, v. 2, n. 3, p. 2389–2406, 2018.

Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1802.09345>. Acesso em: 25 mai. 2023.

YU, J., ZHENG, X., PEUCHERET, C. J. Optical Signal Processing. **Lightware Technology**, v. 13, p. 502, 2001. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123743022500097>. Acesso em: 18 jun. 2023.

ZHANG, J.; XIANG, Y.; WANG, C.; CHEN, Y.; TJIN, S. C.; WEI, L. Recent advances in optical fiber enabled radiation sensors. **Sensors.**, v. 22, p. 1126, 2022. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/1126>. Acesso em: 26 nov. 2023.

ZHANG, W.; WEBB, D. J. Performances of PMMA-based optical fiber Bragg grating sensor in extended temperature range. **Photonics**, Birmingham, v. 8, n. 6, p. 180, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-6732/8/6/180>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ZHU, Y.; ROMAIN, C.; WILLIAMS, C. K. Sustainable polymers from renewable resources. **Nature publishing group**, v. 540, p. 354-362, 2016. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27974763/>. Acesso em: 13 jul. 2023.

ZIEMANN, O.; KRAUSER, J.; ZAMZOW, P. E.; DAUM, W. POF Handbook (optical short range transmission system). **Springer**, 2nd ed., 2008.

ZUBIA, J.; ARRUE, J. Plastic optical fibers: an introduction to their technological processes and applications. **Optical fiber technology**, Orlando, v. 7, n. 2, p. 101–140, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1068520000903559>. Acesso em: 18 out. 2023.