

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FERNANDA MIRANDA BORRASCA

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS FILAMENTOS DE
POLIPROPILENO RECICLADO E POSSÍVEIS APLICAÇÕES TÊXTEIS**

**APUCARANA
2023**

FERNANDA MIRANDA BORRASCA

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS FILAMENTOS DE
POLIPROPILENO RECICLADO E POSSÍVEIS APLICAÇÕES TÊXTEIS**

**Characterization of the Properties of Recycling Polypropylene Filaments and
Possible Textile Applications**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Têxtil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Samira da Silva Mendes.

Coorientador(a): Sarah Honorato Lopes da Silva.

APUCARANA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FERNANDA MIRANDA BORRASCA

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS FILAMENTOS DE
POLIPROPILENO RECICLADO E POSSÍVEIS APLICAÇÕES TÊXTEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Têxtil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 08/dezembro/2023

Samira da Silva Mendes
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dayane Samara de Carvalho Coltre
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Milena Martins Andrade
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

APUCARANA

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por toda experiência vivida e pelas oportunidades durante este ano de 2023, foi o melhor ano de toda a minha vida.

Obrigada a minha orientadora Prof^a. Samira e coorientadora Prof^a Sarah, que me deram a oportunidade de desenvolver essa pesquisa que me trouxe muito desenvolvimento pessoal e profissional, além da confirmação do desejo de seguir a carreira acadêmica.

Querida Prof^a. Samira, obrigada pela sua paciência e dedicação nas correções e sugestões feitas durante todo esse ano, que permitiram que fosse possível tantos resultados e considerações positivas como também por todo o apoio, mesmo que a distância, durante estágio em Portugal, você foi peça fundamental nessa trajetória! Tenho muito orgulho de ter sido sua aluna e orientanda, e te levarei sempre comigo como referência profissional.

Também, devo agradecer a todos os professores da graduação que compartilharam seus conhecimentos e contribuíram para minha formação profissional e pessoal, em especial a Prof^a. Dayane e Prof^a. Milena que foram a banca do TCC1 e TCC2, que com toda a sua bagagem (que não é pouca) avaliaram e elevaram o meu trabalho.

Agradeço também ao Nicolas, meu noivo, que sempre esteve ao meu lado me apoiando e me incentivando a não desistir quando tudo pareceu impossível, mesmo em quase 3 meses longe durante o meu estágio em Portugal, nunca me deixou abalar e sempre evidenciou a minha capacidade.

Obrigada a minha mãe Angelita, que me permitiu vivenciar a maior e melhor experiência de toda a minha vida que foi estar em Portugal, me descobrindo e me realizando como pessoa e profissionalmente, e todo o apoio durante a graduação! Isso tudo também é por você.

Não posso deixar de fora os meus amigos de Apucarana, Arapongas e Guimarães que foram fundamentais em todos os momentos, sempre me apoiando e me motivando, vocês se eternizaram em mim e eu espero que também tenha deixado minha marca em vocês.

Um grandíssimo obrigada a Associação Fibrenamics que me abriu as portas para desenvolvimento desta pesquisa, abraçaram a causa e juntos obtivemos resultados muito relevantes, levarei vocês na memória e no coração! Em especial, a

Catarina e Liliana que apostaram em mim e me ensinaram muito. Além do mais obrigada aos técnicos dos laboratórios da UMinho que sempre foram prestativos e atenciosos.

Por fim, como maior resultado deste trabalho temos uma Fernanda mais madura, decidida e confiante para ingressar com garra e determinação na jornada da pesquisa e contribuir ainda mais para o universo têxtil que é tão incrível.

RESUMO

A fiação sintética por fusão ocorre por meio de um processo que transforma os polímeros termoplásticos, através da temperatura e extrusão, em filamentos. Um dos polímeros utilizados nesse processo é o polipropileno (PP), que possui uma vasta gama de aplicações na cadeia têxtil, sendo encontrado no segmento doméstico, técnico, vestuário e médico. Com a alta produção, o descarte também se torna elevado, visto que os produtos de polipropileno são um tipo de plástico e demoram em torno de 400 anos para se degradar no meio ambiente, a reciclagem deste polímero é explorada. No entanto, os processos de degradação durante a vida útil dos produtos e na reciclagem, podem alterar as propriedades e características do polímero. Deste modo, o presente trabalho realizou um estudo comparativo entre o polipropileno virgem e o reciclado na configuração de polímero, analisando o comportamento dos materiais por meio das análises de Termogravimétrica, Calorimetria Exploratória Diferencial e Difração de Raio-X, das quais foi possível constatar as temperaturas de fusão e degradação para estabelecer a faixa de aquecimento da extrusora, além de definir que a cristalinidade não foi alterada significativamente pela reciclagem. Realizou-se a extrusão de diferentes proporções de composição de polipropileno virgem e reciclado (PPv/PPr) 30/70, 50/50 e 70/30, com intuito de avaliar a viabilidade do PPr para aplicações têxteis alternativas, foi utilizado análise Termogravimétrica, Calorimetria Exploratória Diferencial, Difração de Raio-X, Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier e Microscopia Eletrônica de Varredura, e pode-se observar que o filamento PPv/PPr 30/70 apresentou comportamentos semelhantes ao filamento de polipropileno virgem quanto as características térmicas, químicas e físicas, indicando que a utilização do PPr pode ser considerada para produtos têxteis sustentáveis, ainda mais pela contribuição aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) e pelos ganhos financeiros que podem ser obtidos a partir do uso do polipropileno reciclado.

Palavras-chave: reciclagem; extrusão; caracterização.

ABSTRACT

Synthetic melt spinning occurs through a process that transforms thermoplastic polymers, through temperature and extrusion, into filaments. One of the polymers used in this process is polypropylene (PP), which has a wide range of applications in the textile chain, being found in the domestic, technical, clothing and medical segments. With high production, disposal also becomes high, as polypropylene products are a type of plastic and take around 400 years to degrade in the environment, recycling this polymer is explored. However, degradation processes during the useful life of the products and during recycling can change the properties and characteristics of the polymer. Thus, the present work carried out a comparative study between virgin and recycled polypropylene in the polymer configuration, analyzing the behavior of the materials through Thermogravimetric, Differential Scanning Calorimetry and X-Ray Diffraction analyses, from which it was possible to verify the melting and degradation temperatures for establish the extruder heating range, in addition to defining that the crystallinity was not significantly altered by recycling. The extrusion of different proportions of virgin and recycled polypropylene composition (PPv/PPr) 30/70, 50/50 and 70/30 was carried out, to evaluate the viability of PPr for alternative textile applications. Thermogravimetric analysis, Differential Exploratory Calorimetry, X-ray Diffraction, Infrared Spectroscopy with Fourier Transform and Scanning Electron Microscopy were used, and it can be observed that the PPv/PPr 30/70 filament showed similar behavior to the virgin polypropylene filament regarding thermal, chemical and physical characteristics, indirectly the use of PPr can be considered for sustainable textile products, even more so due to its contribution to the Sustainable Development Goals (SDGs) and the financial gains that can be obtained from the use of recycled polypropylene .

Keywords: recycling; extrusion; characterization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma simplificado da indústria têxtil.....	16
Figura 2 – Representação esquemática da fiação por fusão.	18
Figura 3 – Reação de polimerização do polipropileno.....	20
Figura 4 – Estrutura molecular do polipropileno isotático (a), sindiotático (b) e atático (c).	21
Figura 5 – <i>Pellets</i> de polipropileno.	22
Figura 6 – Rosca dupla utilizada na extrusora.	27
Figura 7 – Representação esquemática de extrusora rosca dupla.....	28
Figura 8 – <i>Pellets</i> de polipropileno reciclado.	28
Figura 9 – Sistema de identificação de plásticos ABNT.	29
Figura 10 – Polipropileno virgem PPv.	32
Figura 11 – Polipropileno reciclado PPr.....	33
Figura 12 – Quadro de métodos.....	33
Figura 13 – Equipamento análise Termogravimétrica.	35
Figura 14 – Cadinhos de alumina.	35
Figura 15 – Equipamento análise Difração de Raio-X.....	36
Figura 16 – Estufa.	37
Figura 17 – Extrusora bifuso.....	38
Figura 18 – Espectrômetro Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier.....	41
Figura 19 – Equipamento análise Microscopia Eletrônica de Varredura.	42
Figura 20 – Gráficos das análises Termogravimétrica para PPv e PPr.....	43
Figura 21 – Gráficos das análises de Calorimetria Exploratória Diferencial para PPv e PPr.	45
Figura 22 – Difractogramas das análises de Difração de Raio-X para PPv e PPr.	46
Figura 23 – Passagem do PPv e PPr na fieira.....	47
Figura 24 – Gráficos das análises Termogravimétricas para os filamentos 30/70, 50/50 e 70/30.	49
Figura 25 – Gráficos das análise de Calorimetria Exploratória Diferencial para o filamentos 30/70, 50/50 e 70/30.....	51
Figura 26 – Difractogramas das análises de Difração de Raio-X para o 30/70, 50/50 e 70/30.	53
Figura 27 – Espectros de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier sobrepostos de PPv, PPr, 30/70, 50/50 e 70/30.....	55
Figura 28 – Micrografias filamentos A – PPv, B – PPr, C – 30/70, D – 50/50 e E – 70/30.	56
Figura 29 – Micrografia fraturas filamentos A – PPv, B – PPr, C – 30/70, D – 50/50 e E – 70/30.....	57
Quadro 1 – Produção dos filamentos.....	39
Quadro 2 – Filamentos produzidos.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades da fibra de polipropileno.	23
Tabela 2 – Propriedades do SUMITOMO Polypropylene Y101.	32
Tabela 3 – Temperaturas das zonas de aquecimento.	40
Tabela 4 – Resultados das análises Termogravimétrica para PPv e PPr.	44
Tabela 5 – Resultados das análises de Calorimetria Exploratória Diferencial para PPv e PPr.	45
Tabela 6 – Resultados das análises de Difração de Raio-X para PPv e PPr.	46
Tabela 7 – Resultados das análises Termogravimétricas para os filamentos 30/70, 50/50 e 70/30.	50
Tabela 8 – Resultados das análises de Calorimetria Exploratória Diferencial para os filamentos 30/70, 50/50 e 70/30.	52
Tabela 9 – Resultados das análises de Difração de Raio-X para o filamento 30/70, 50/50 e 70/30.	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

30/70	Filamento 30% Polipropileno Virgem e 70% Polipropileno Reciclado
50/50	Filamento 50% Polipropileno Virgem e 50% Polipropileno Reciclado
70/30	Filamento 70% Polipropileno Virgem e 30% Polipropileno Reciclado
ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DMM	Distribuição de Massa Molar
DRX	<i>X-ray Diffraction</i> – Difração de Raios-X
DSC	<i>Differential Exploratory Calorimetry</i> – Calorimetria Exploratória Diferencial
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> – Infravermelho por Transformada de Fourier
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
MFI	<i>Melt Flux Index</i> - Índice de Fluidéz
MEV	<i>Scanning Electron Microscopy</i> – Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Normas Brasileiras
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
PP	Polipropileno
PPr	Polipropileno Reciclado
PPv	Polipropileno Virgem
TGA	<i>Thermogravimetric Analysis</i> – Análise Termogravimétrica
UMINHO	Universidade do Minho

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
cN	CentiNewton
C	Carbono
ΔH_f	Entalpia de fusão
°C	Grau Celsius
GPa	Giga Pascal
g	Gramas
H	Hidrogênio
kJ	KiloJoule
kW	KiloWatts
m	Metro
mA	MiliAmper
mm	Milímetros
min	Minuto
MPa	MegaPascal
mol	Quantidade de substância
O	Oxigênio
%	Porcentual
kg	Quilograma
s	Segundo
T_d	Temperatura de degradação
tex	Massa por mil metros de fio
T_f	Temperatura de fusão
T_g	Temperatura de transição vítrea
T_{id}	Temperatura início de degradação
T_m	Temperatura máxima de degradação
T_z	Temperatura zona de aquecimento da extrusora
θ	Theta
X_c	Grau de cristalinidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	15
1.1.1	Objetivos Gerais	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Indústria Têxtil	16
2.1.1	Fiação Sintética	17
2.2	Polipropileno: produção, propriedades, aplicações	19
2.2.1	Reciclagem do Polipropileno	25
2.3	Polipropileno Reciclado: propriedades, produção e aplicações	29
3	METODOLOGIA	32
3.1	Materiais	32
3.2	Métodos	33
3.2.1	Caracterização dos polímeros	34
3.2.1.1	<u>Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos polímeros</u>	<u>34</u>
3.2.1.2	<u>Difração de Raio-X (DRX) dos polímeros</u>	<u>36</u>
3.2.2	Produção dos filamentos	37
3.2.3	Caracterização dos Filamentos	40
3.2.3.1	<u>Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos filamentos</u>	<u>40</u>
3.2.3.2	<u>Difração de Raio-X (DRX) dos filamentos</u>	<u>41</u>
3.2.3.3	<u>Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos filamentos</u>	<u>41</u>
3.2.3.4	<u>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</u>	<u>42</u>
4	RESULTADOS	43
4.1	Caracterização dos Polímeros	43
4.1.1	Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos polímeros	43
4.1.2	Difração de Raio-X (DRX) dos polímeros	46
4.2	Produção dos Filamentos	47
4.3	Caracterização dos Filamentos	49
4.3.1	Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos filamentos	49

4.3.2	Difração de Raio-X (DRX) dos filamentos	52
4.3.3	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos Filamentos	54
4.3.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	56
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é a segunda maior empregadora de serviços da indústria de transformação no país, ficando atrás apenas do conjunto de alimentos e bebidas. O Brasil possui a maior cadeia têxtil completa do ocidente, abrangendo desde a produção de fibras até o desfile de moda, percorrendo pelos processos de fiações, tecelagens, malharias, beneficiadoras e confecções dos produtos (ABIT, 2023).

O fio têxtil é o produto da etapa de fiação, que pode ser fabricado a partir de fibras naturais, artificiais e sintéticas. A fiação das fibras sintéticas pode ser realizada por fiação a úmido, fiação a seco e fiação por fusão, sendo esta última a mais utilizada por ser a mais econômica devido ao fato de que não há solvente recuperado ou evaporado como na fiação da solução (Asmatulu; Khan, 2019).

O polipropileno (PP) se tornou mais utilizado para fiação por fusão devido aos resultados e desenvolvimentos de processos, que o colocaram em uma posição extremamente competitiva em comparação com outras fibras sintéticas (Schäfer, 1999). O polímero citado possui propriedades que permitem a ampla aplicação no setor têxtil, incluindo a área técnica, médica, vestuário e do lar.

Pela grande aplicabilidade do polipropileno, os resíduos gerados também são de quantidade expressiva e, por se tratar de um plástico que demora muitos anos para se decompor, não deve ser descartado incorretamente.

Uma maneira de reduzir os impactos causados pela produção de plásticos é a reciclagem, pois reciclar é mais do que reaproveitar o material. Reciclar é economizar recursos energéticos e naturais, e obter ganhos financeiros e ambientais (Gorni, 2003).

Os estudos atuais sobre reciclagem e economia circular de resíduos da indústria têxtil abrangem os resíduos provenientes da confecção e em sua maioria de origem natural como algodão, mas ainda há a necessidade de explorar o polipropileno, matéria-prima sintética, assim como sua reciclagem para aplicações têxteis. O aprofundamento das propriedades e caracterização mais detalhadas sobre o polipropileno reciclado, resultará em aplicações em diversas áreas além do setor têxtil que possui uma alta produção em constante crescimento e demandas elevadas. Além da contribuição para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em relação a cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11) e ao consumo e produção responsáveis (ODS 12).

1.1 Justificativa

A indústria têxtil no Brasil é caracterizada pela sua dimensão e volume de produção, e segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção, o Brasil no ano de 2021 produziu 2,16 milhões de toneladas e 8,1 bilhões de peças. Porém, com o alto potencial de produção, torna-se um setor com alto poder gerador de resíduos, que normalmente não recebem a destinação correta (ABIT, 2023).

Os resíduos têxteis são diferenciados pela origem, podendo ser sintética, natural ou artificial. As fibras de origem sintética são produzidas com produtos químicos de origem petrolífera, entre elas está o polipropileno (PP) que possui diversas aplicações na indústria têxtil. No Brasil foram consumidas 135 mil toneladas de fibra de polipropileno, no ano de 2019 (ABIT, 2019).

O polipropileno também é utilizado em aplicações de vida curta, artigos que usualmente são descartados em um prazo máximo de dois anos (PLASTIVIDA, 2012), o que implica que uma grande quantidade de resíduos é gerada em um curto período. Desta forma, há uma crescente preocupação com a disposição final desses resíduos, visto que é um polímero termoplástico, o polipropileno pode ser moldado novamente quando submetido a temperaturas elevadas, o que faz com que seja passível de ser reciclado (Spinacé; De Paoli, 2005).

A agressão ao meio ambiente causada pelos resíduos originados nos processos, serviços e produtos utilizados tornou-se uma preocupação crescente em diversos setores industriais. Os polímeros sintéticos e os naturais modificados, utilizados em embalagens diversas, são considerados um dos grandes vilões da poluição ambiental, principalmente quando se refere aos danos causados pelos resíduos urbanos (Mustafa, 1993).

A reciclagem desse material apresenta diversos benefícios como “a economia de energia, a preservação de fontes esgotáveis de matéria-prima, a redução de custos com disposição final do resíduo, a economia com a recuperação de áreas impactadas pelo mau acondicionamento dos resíduos, o aumento da vida útil dos aterros sanitários, a redução de gastos com a limpeza, melhoria da saúde pública e a geração de emprego e renda” (Spinacé; De Paoli, 2005).

No ano de 2020, foram consumidas 1,4 milhão de toneladas de resíduo plástico na reciclagem, sendo 1 milhão de toneladas de plástico pós-consumo, ou seja, material descartado em domicílios, *shoppings*, comércios, escritórios, entre

outros lugares. Deste montante, os artigos de polipropileno correspondem a 16,7% (ABIPLAST, 2021).

Com estes fatos, o estudo sobre a viabilidade do polipropileno reciclado para que atinja as exigências de cada aplicação se faz necessário para que o impacto ambiental seja reduzido e traga benefícios financeiros.

1.2 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Avaliar as características e propriedades dos filamentos com diferentes proporções de incorporação de polipropileno reciclado e polipropileno virgem, a fim de identificar a viabilidade para aplicações têxteis de forma sustentável.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as propriedades térmicas, físicas e químicas do polipropileno virgem e reciclado;
- Extrusar os filamentos com diferentes proporções de incorporação de polipropileno virgem e reciclado;
- Caracterizar as propriedades térmicas, físicas e químicas dos filamentos com proporções distintas de polipropileno virgem e reciclado;
- Analisar a viabilidade do uso de polipropileno reciclado em aplicações têxteis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

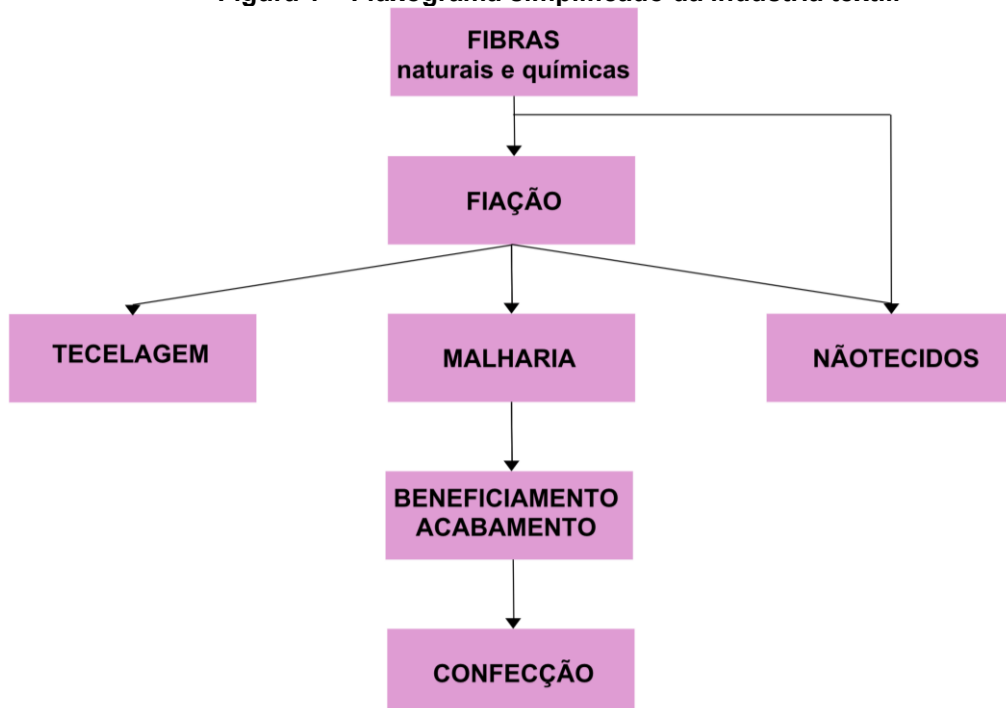
2.1 Indústria Têxtil

O Brasil tem a maior e mais completa cadeia têxtil do Ocidente, sendo que no ano de 2022 era composta por mais de 22.000 empresas em toda sua dimensão, sendo responsável por empregar diretamente cerca de 1,34 milhão de colaboradores, além de 8 milhões de empregos indiretos (ABIT, 2023).

A cadeia produtiva têxtil é formada por diversos segmentos industriais que são autônomos, cuja interação, porém, é fundamental para a sua organização (Costa; Rocha, 2009).

A cadeia produtiva têxtil engloba uma sequência de etapas que estão correlacionadas, que vão desde a fibra à distribuição final do produto. Na Figura 1, é apresentada a cadeia produtiva têxtil por meio de um fluxograma simplificado.

Figura 1 – Fluxograma simplificado da indústria têxtil.



Fonte: Adaptado de ABIT (2013).

Todos os setores da cadeia têxtil têm como base principal as fibras têxteis, que são classificadas como fibras naturais ou fibras químicas. As fibras têxteis naturais são fibras que necessitam de processos físicos para transformá-los em fios, sendo

elas de origem vegetal, animal ou mineral, como por exemplo as fibras de algodão, lã, cânhamo, juta, seda, entre outras (Lobo; Limeira; Marques, 2014).

As fibras têxteis químicas se dividem em artificiais e sintéticas, as artificiais são originadas da natureza e sucedem de serviço humano mediante a processos físicos e químicos, já as fibras sintéticas são obtidas somente por processos industriais físicos e químicos. As fibras artificiais utilizam como matéria-prima polímeros naturais, por exemplo a celulose, a qual passa por processo de modificação ou regeneração química, dando origem às fibras tais como a viscose, acetato, entre outras. As fibras sintéticas são fibras produzidas com produtos químicos, de origem petrolífera, como o poliéster, poliamida, polipropileno e outras (Lobo; Limeira; Marques, 2014).

As fibras sintéticas são um produto resultante da conformação mecânica dos polímeros sintéticos, foram desenvolvidas inicialmente com o objetivo de copiar e melhorar as características e propriedades das fibras naturais. Seu processo de produção, majoritariamente, pode ser realizado mediante a fusão e extrusão e podem apresentar formatos distintos e diversas aplicações (Brito Júnior *et al.*, 2013).

2.1.1 Fiação Sintética

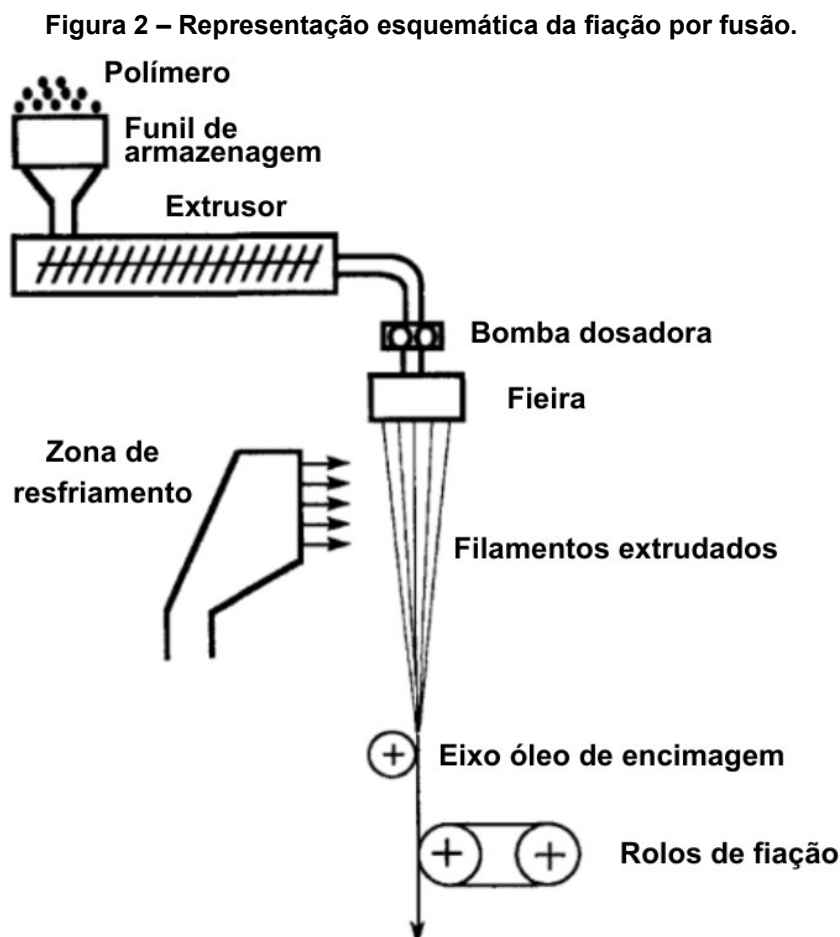
O processo de fiação sintética pode ser dividido em dois métodos principais: fiação por fusão e fiação da solução, sendo este último subdividido em fiação a seco e fiação úmida (Fourné, 1999; Mishra, 2005). A fiação da solução, foi desenvolvida, principalmente, como uma alternativa para produção de fibras dos polímeros que são instáveis termicamente, ou seja, polímeros que são degradados sob aquecimento. Na fiação a seco, os filamentos resultantes são imediatamente solidificados em contracorrente de ar ou gás inerte aquecido dentro de uma câmara vertical, e na fiação a úmido os filamentos resultantes são imediatamente precipitados em um banho coagulante (Mishra, 2005; Sen, 2008).

A fiação por fusão, é um processo contínuo, aplicável a polímeros termoplásticos de difícil solubilidade e alta resistência ao calor, permite a obtenção de fibras através da passagem do polímero fundido por uma placa contendo orifícios (fieira), onde são formados filamentos viscosos que se solidificam por resfriamento e são continuamente enrolados em bobinas (Mano; Mendes, 1999).

Para realizar a fiação por fusão é necessário que o polímero utilizado se torne fusível abaixo de sua temperatura de degradação e, além disso, tenha mobilidade alta

o suficiente das cadeias moleculares para se desemaranhar e se desdobrar sob estresse e se orientar na direção da fibra sob tensão. Desta forma, polímeros lineares são mais adequados para o processo de fiação por fusão e este método é o mais comumente utilizado para fabricação de fibras sintéticas comerciais (Hufenus *et. al* 2020).

Uma representação básica de um processo de fiação por fusão é ilustrada na Figura 2. O polímero pode ser encontrado em diferentes formas como *pellets*, grânulos ou *chips* (se diferem pelo diâmetro), que são colocados em um funil de armazenagem, o qual alimentam um extrusor em que são fundidos e bombeados através da bomba dosadora que controla a velocidade de extrusão, assim como a filtragem e distribuição do polímero fundido para a fieira (Spruiell; Bond, 1999).



Fonte: Adaptado de Spruiell e Bond (1999).

De acordo com Spruiell e Bond (1999), os filamentos fundidos que saem da fieira entram em uma zona de resfriamento que os esfria e solidifica, em seguida são

simultaneamente direcionados para uma área de seção transversal menor pela aplicação de uma força, esta força pode ser aplicada pela ação da bomba dosadora que controla a velocidade de extrusão, mantendo a alimentação do polímero constante durante todo o processo.

As principais variáveis do processo de fiação por fusão são temperatura de extrusão, taxa mássica de polímero, velocidade de extrusão, o tamanho e a forma dos orifícios da fiação, taxa de estiragem, condições de resfriamento e velocidade de fiação (velocidade dos rolos). Essas variáveis de processo interagem diretamente com a estrutura e propriedades dos filamentos, devido ao controle da processabilidade (Spruiell; Bond, 1999).

Nadkarni (1997) afirma que o índice de fluidez e a velocidade de fiação influenciam na qualidade do filamento, ou seja, para uma taxa de fluxo constante deve-se aumentar a velocidade de fiação, resultando em mais orientação devido ao maior alongamento. Ao contrário, quando se tem uma velocidade de fiação constante, a orientação é reduzida à medida que a taxa de fluxo aumenta, porque o diâmetro do filamento expande rapidamente com a taxa de fluxo mesmo que a tensão na rotação diminua, com isso é possível produzir uma variedade de filamentos com diferentes tenacidades.

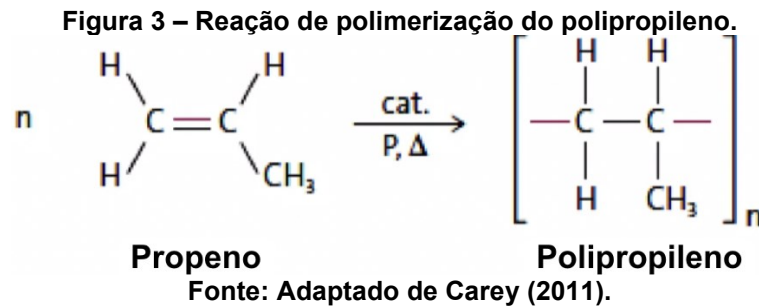
Conforme Schäfer (1999), o polipropileno (PP) se tornou mais relevante dentro da família de materiais poliméricos para fiação de fibras devido aos resultados e desenvolvimentos de processos, que o colocaram em uma posição extremamente competitiva em comparação com outras fibras sintéticas.

A alta taxa de crescimento de fibras de polipropileno não se dá apenas por razões econômicas, mas pelas propriedades como facilidade de processamento, excelente capacidade de tingimento por fusão, boa taxa de isolamento, alta absorção e propriedade higroscópica (Schäfer, 1999).

2.2 Polipropileno: produção, propriedades, aplicações

A produção de polipropileno ocorre pela polimerização do propeno, nome dado pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), ou também conhecido pelo seu nome comum propileno, em reação de adição com condições de temperatura e pressão controladas e com a presença do sistema de catalisador Ziegler-Natta. O propeno faz parte dos grupos das poliolefinas, isto é, tem como

monômero uma olefina simples, ou alceno (C_nH_{2n}), origina-se do refino do petróleo sendo um subproduto gasoso. O propeno tem a fórmula química C_3H_6 , sendo então um hidrocarboneto insaturado (Carey, 2011). A reação de polimerização está esquematizada na Figura 3.



Definido como termoplástico poliolefinico, o polipropileno é resistente e maleável a temperatura ambiente. A característica de cristalinidade, entre 60 e 70%, garante ao polipropileno alta resistência mecânica, rigidez e dureza, o que se mantém em temperaturas elevadas. Além disso, o polipropileno possui características como massa molar entre 80.000 e 500.000 g/mol, estrutura semicristalina e densidade de aproximadamente $0,90 \text{ g/cm}^3$ (Callister, 1997).

De acordo com Carey (2011), durante a polimerização podem surgir três casos como representados a seguir, na Figura 4(a) a estrutura tem todos os grupos metila orientados na mesma direção em relação à cadeia polimérica, essa organização estereoquímica é chamada de isotática. Outra forma chamada sindiotática, mostrada na Figura 4(b), tem seus grupos metila alternando-se da frente para trás ao longo da cadeia. Por fim, uma terceira possibilidade, mostrada na Figura 4(c) é descrita como atática, esse polipropileno tem uma orientação aleatória de seus grupos metila, ou seja, não é um polímero estereorregular.

Tanto o polipropileno isotático quanto o sindiotático são conhecidos como polímeros estereorregulares porque cada um é caracterizado por uma estereoquímica exata no átomo de carbono que tem o grupo metila. As cadeias de polipropileno associam-se entre si devido as forças de atração de Van der Waals, a extensão dessa associação é relativamente grande para os polímeros isotático e sindiotático, porque a estereorregularidade das cadeias poliméricas permite uma compactação eficiente (Carey, 2011).

Figura 4 – Estrutura molecular do polipropileno isotático (a), sindiotático (b) e atático (c).



(a) Polipropileno isotático



(b) Polipropileno sindiotático



(c) Polipropileno atático

Fonte: Carey (2011).

Segundo Carey (2011), o polipropileno atático, por outro lado, não se associa com tanta força, ele tem uma densidade mais baixa e menor ponto de fusão que as formas estereorregulares, sendo as propriedades físicas do polipropileno estereorregular são mais úteis para a maioria das finalidades que as do polipropileno atático. Quando o propeno é polimerizado sob condições de radicais livres, o polipropileno que resulta é atático. Os catalisadores do tipo Ziegler-Natta permitem a preparação do polipropileno isotático ou sindiotático, sendo a maioria dos produtos de polipropileno feita com o isotático.

Rosário *et al.* (2011) aponta que o polipropileno (PP) isotático apresenta um ponto de fusão que pode alcançar o valor de 176 °C e a temperatura de transição vítrea entre -13 a 0 °C, enquanto para o polipropileno sindiotático o ponto de fusão está entre 135 °C. Como o polipropileno atático não cristaliza, não possui ponto de fusão e apresenta somente temperatura de transição vítrea, entre - 18 a 5 °C.

Mano e Mendes (1999) afirmam que ao contrário das substâncias químicas comuns, os polímeros não são produtos homogêneos pois contêm mistura de moléculas de pesos variados, apresentando uma polimolecularidade. Quando o polímero tem apenas um tipo de mero, usa-se a expressão homopolímero, no caso quando há mais de um tipo de mero, é designado copolímero.

O polipropileno pode ser produzido em três tipos em relação a quantidade de polímeros: homopolímero, copolímero heterofásico e copolímero randômico, com índices de fluidez que podem variar de 0,6 a 100 g/10min. O copolímero randômico se obtém pela adição de eteno e propeno, já o copolímero heterofásico é fabricado em duas etapas de polimerização, primeiro produz o homopolímero e esse material segue para um segundo reator onde então é realizada a copolimerização de propeno com eteno. O homopolímero é o mais utilizado porque é mais rígido e resistente do que copolímero heterofásico e randômico, além de ter baixo custo, baixa densidade, alta resistência à fadiga por flexão, além de boa resistência mecânica e térmica, possui também equilíbrio entre as propriedades químicas, fator que permite ser utilizado em muitas aplicações (Michaeli, 2005; Callister; Rethwisch, 2014).

O polipropileno (PP) é geralmente disponível na forma de *chips*, grânulos ou *pellets* que são de cor branca e semicristalina, assim como pode ser visto na Figura 5. O polímero é vendido em uma variedade de pesos moleculares, que são caracterizados pelo índice de fluidez (*melt flow index* - MFI), que tem como unidade de medida g/10min, e os polímeros com índice de fluidez mais alto geralmente produzem fibras com maior tenacidade e menor alongamento (Sen, 1997).

Figura 5 – Pellets de polipropileno.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Mao *et al.* (2016) evidencia que o polipropileno com alto índice de fluidez possui baixa massa molecular e, devido à viscosidade mais baixa, exige que a

velocidade de extrusão seja mais rápida, no entanto o polipropileno com baixo índice de fluidez, tem alto peso molecular e alta viscosidade. Para extrusar com êxito os polímeros de alta viscosidade, é necessário aumentar a temperatura de extrusão e diminuir a velocidade de extrusão (Mao *et. al* 2016). A Tabela 1 fornece algumas propriedades da fibra de polipropileno (PP), sendo T_g a temperatura de transição vítrea, T_f a temperatura de fusão e T_d a temperatura de degradação.

Tabela 1 – Propriedades da fibra de polipropileno.

Fibra	Densidade (g/cm ³)	T_g (°C)	T_f (°C)	T_d (°C)	Módulo de Young (GPa)	Tenacidade (cN/tex)	Alongamento (%)
Polipropileno	0,91	-15	170	399	1,1-4,1	35,3-61,8	15-30%

Fonte: Adaptado de Hufenus *et. al* (2020) e Kaswell (1963).

A densidade é expressa em g/cm³ e representa a proporção entre a massa e o volume, no caso de polímeros termoplásticos a combinação de baixa densidade (menor do que 1 g/cm³), resistência química, custo baixo e um balanço entre rigidez e tenacidade permite com que se tornem mais utilizados (Lobo; Limeira; Marques, 2014; Elmajdoubi; Vu-Khanh, 2003).

De acordo com Lobo, Limeira e Marques (2014), a temperatura de transição vítrea (T_g) é uma das propriedades térmicas fundamentais, e pode ser usada para distinguir duas categorias de polímeros: os plásticos e os elastômeros, entende-se pela temperatura abaixo da qual um polímero amorfo se torna duro e frágil em estado vítreo, e acima da qual o mesmo polímero se torna maleável.

A temperatura de fusão (T_f) de uma substância pura é a temperatura em que a fase sólida e a fase líquida coexistem, entram em um estado de equilíbrio. Nesse ponto, uma adição de energia (calor) também conhecida por calor latente de fusão, é utilizada para romper a estrutura sólida, e a temperatura permanece constante, não aumenta até que a substância tenha se fundido por completo, a energia utilizada pelo sistema para elevar a temperatura, é denominada de calor sensível (Lobo; Limeira; Marques, 2014).

Segundo Hufenus *et al.* (2020), um dos requisitos básicos para a fiação por fusão é que o polímero utilizado se torne fusível abaixo de sua temperatura de degradação (T_d), em alguns casos a temperatura máxima de extrusão permitida pode ser muito abaixo da temperatura de degradação (T_d), porém, alguns polímeros possuem sua janela de processamento muito próxima a essa temperatura, além de

que os polímeros utilizados devem ter como propriedade resistir a temperatura de extrusão e a tensão de cisalhamento com degradação mínima, ou seja, devem possuir boa estabilidade térmica.

Como aponta Lobo, Limeira e Marques (2014), o Módulo de Young trata-se da constante de proporcionalidade entre as tensões aplicadas e as deformações sofridas por um material, quanto maior a tensão necessária para o mesmo grau de deformação, mais rígido é o material.

No que se refere a tenacidade na área têxtil, é a relação entre a força (cN) necessária para haver a ruptura da amostra e o seu título (tex), quando submetida a uma carga longitudinal. Consiste em uma propriedade que indica a resistência contra uma fratura, quando é aplicada nela uma força de tração. A elevada tenacidade significa que as moléculas do material apresentam grande coesão entre elas (Lobo; Limeira; Marques, 2014).

De acordo com Jambrich e Hodul (1999), o desempenho das fibras de polipropileno é favorecido pela disponibilidade de matéria-prima, baixo custo, fácil formação de filamentos, bem como pelas suas propriedades físico-mecânicas que permitem a ampla aplicação em áreas como têxteis para o âmbito doméstico, têxteis técnicos e vestuário. As principais categorias de fibras de polipropileno são: monofilamentos, multifilamentos, fibras descontínuas, não tecidos, fitas e filmes.

Os principais campos de aplicação de fibras de polipropileno em materiais têxteis são: forros, tapetes, produtos de higiene, fitas, cordas, artigos esportivos, geotêxteis, *big bags*, têxteis técnicos e médicos, entre outros. As fibras descontínuas de polipropileno são destinadas à produção de artigos domésticos como: carpetes, tapetes, forros e revestimentos de superfícies (Jambrich; Hodul, 1999).

Os não tecidos fabricados de polipropileno são utilizados na fabricação de mantas aplicadas para os geotêxteis utilizados na construção de estradas, rodovias, túneis e ferrovias, assim como estabilização de corpos hídricos. Na indústria e artigos esportivos, as fibras de polipropileno são utilizadas para meias, luvas, roupas esportivas e vestimentas para proteções especiais. Na área de têxteis médicos, é possível encontrar o polipropileno presente em suturas, bandagens, membranas artificiais e uniformes cirúrgicos (Jambrich; Hodul, 1999).

O polipropileno é um plástico amplamente utilizado e corresponde por 16% da produção mundial no mercado de plásticos (Bora; Wang; You, 2020). Uma vez que o

polipropileno é amplamente utilizado para uma variedade de produtos, também é grandemente descartado (Watt *et al.*, 2020).

Os produtos feitos de polipropileno, são plásticos que não devem ser descartados incorretamente em aterros ou em lixões a céu aberto, pois têm um tempo de degradação muito alto no meio ambiente, segundo o Manual de Educação para o Consumo Sustentável, leva-se mais que 400 anos para a decomposição do plástico no meio ambiente (Brasil, 2005).

De acordo com dados divulgados em 2019 pelo Fundo Mundial para a Natureza - *World Wide Fund for Nature* (WWF), o Brasil é o 4º maior produtor de lixo plástico no mundo, com 11,3 milhões de toneladas, desse total, 91% foram coletadas o que representa mais de 10,3 milhões de toneladas, mas apenas 145 mil toneladas (1,28%) foram reprocessadas na cadeia de produção. Entretanto, há perdas na separação dos resíduos para reciclagem por conta da contaminação, resultando em 7,7 milhões de toneladas de plásticos destinados aos aterros sanitários. E outros 2,4 milhões de toneladas de plástico são descartados de forma irregular, sem qualquer tipo de tratamento, em lixões a céu aberto (*World Wide Fund for Nature*, 2019).

A necessidade de um modelo mais sustentável de disposição de resíduos tornou-se cada vez mais evidente, uma vez que o sistema linear de produção e escoamento de bens de consumo tem levado ao acúmulo de resíduos, que quando não descartados adequadamente, provocam prejuízos ao meio ambiente e à saúde humana (Wright; Kelly, 2017).

A reciclagem é a abordagem mais viável para reduzir os resíduos sólidos. O principal objetivo da reciclagem é reprocessar os subprodutos das indústrias de volta ao fluxo original ou criar alternativas para produtos (Adanur, 1995).

2.2.1 Reciclagem do Polipropileno

De acordo com Hopewell, Dvorak e Kosior (2009), a terminologia para reciclagem de plásticos é complexa devido à ampla gama de atividades de reciclagem e recuperação. Estas incluem quatro categorias: primária (reprocessamento mecânico em um produto com propriedades equivalentes), secundária (reprocessamento mecânico em produtos que requerem propriedades inferiores), terciária (recuperação de componentes químicos) e quaternária (recuperação de energia).

A reciclagem primária e a secundária são conhecidas como reciclagem mecânica ou física, o que diferencia uma da outra é que na primária utiliza-se polímero pós-industrial e na secundária, pós-consumo. A reciclagem primária, consiste na conversão dos resíduos poliméricos industriais por métodos de processamento padrão em produtos com características equivalentes àquelas dos produtos originais produzidos com polímeros virgens, já a reciclagem secundária pode-se dizer que é a conversão dos resíduos poliméricos provenientes dos resíduos sólidos urbanos por um processo ou uma combinação de processos em produtos que tenham menor exigência de desempenho do que o produto obtido com polímero virgem (Spinacé; De Paoli, 2005).

Segundo a análise da MaxiQuim, em relação a pesquisa disponibilizada pela PicPlast no ano de 2021, 72% da produção de plásticos reciclados no país foram de origem de resíduos pós-consumo, enquanto 28% foram de resíduos pós-industrial (PICPLAST, 2021).

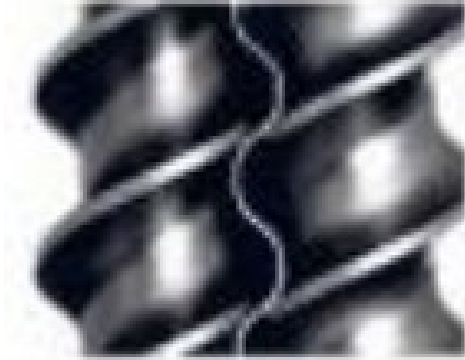
De acordo com Spinacé e De Paoli (2005), a reciclagem mecânica pode ser viabilizada através do reprocessamento por extrusão, injeção, termoformagem, moldagem por compressão, entre outros. Para este fim são necessários alguns procedimentos que incluem as seguintes etapas: 1) separação do resíduo polimérico, 2) lavagem, 3) secagem, 4) moagem, 5) reprocessamento que se define pelo processo de extrusão dos polímeros que estão sendo reciclados em monofilamento que são peletizados e, finalmente, a transformação do *pellets* em produto acabado.

Com descrito na seção 2.1.1, o princípio fundamental do processo extrusão se resume em aumentar a temperatura até alcançar a temperatura de fusão de um material termoplástico, forçando-o a passar através de uma fieira. A extrusora possui um dispositivo de aquecimento e de processamento que pode ter entre um ou mais parafusos e durante o processo podem ser inseridos outros equipamentos como bomba de fusão entre a extrusora e a fieira, calibradores de vácuo, cortadores, enroladores, tanques de água, rolos de resfriamento e moldes (Maier; Calafut, 1998).

A extrusora do tipo rosca é o método utilizado para produzir os *pellets* reciclados, e é presente também no processo de composição, moldagem por sopro e injeção de moldes. Existem vários tipos desta extrusora que são utilizados amplamente na indústria de polímeros, geralmente são classificadas em rosca simples, rosca dupla, ou múltiplas roscas, essa última possui seu uso limitado para pequena escala de produção ou aplicações especiais. A extrusora de rosca simples é

utilizada mais para processamento de polímeros em moldagem por sopro, filmes e injeção de moldes, em contra partida, a de rosca dupla é mais empregada em composição de várias fibras, o seu mecanismo pode ser visto abaixo na Figura 6. (Sakai, 2013).

Figura 6 – Rosca dupla utilizada na extrusora.

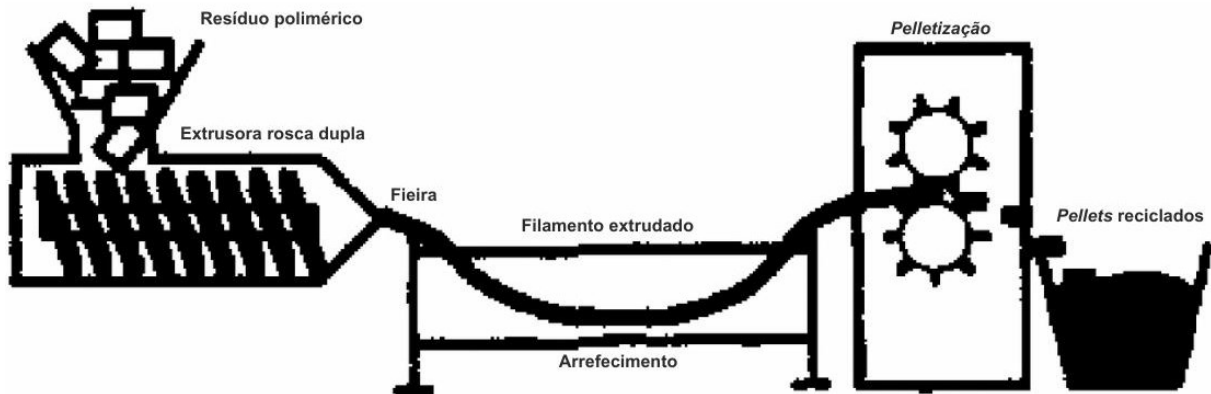


Fonte: Sakai (2013).

De acordo com Sakai (2013), a extrusora de rosca dupla em comparação com a extrusora de rosca simples, possui maior capacidade de fusão e mistura, o que torna o produto mais homogêneo e com distribuição uniforme. A demanda de maior produção com maior valor agregado e menor consumo de energia, além do crescimento do consumo de plástico que exige uma extrusão com maior capacidade e maior performance de mistura, expandiu o uso deste tipo de extrusora.

Como pode ser visto na representação esquemática de extrusora rosca dupla (Figura 7), os resíduos poliméricos a serem extrusados, que já passaram pelas etapas de separação, lavagem e secagem, são colocados em um compartimento onde alimentam a extrusora rosca dupla, nesta parte o polímero é fundido e direcionado até a fieira pelo movimento das roscas. Ao sair pela fieira, que pode contém entre um ou mais orifícios, o filamento precisa se resfriar para que no próximo processo de *pelletização*, se encontre em uma temperatura onde apresente rigidez para que quando quebrado, forme os *pellets* reciclados (Sato; Takarashi; Kurauchi, 1999).

Figura 7 – Representação esquemática de extrusora rosca dupla.



Fonte: Adaptado de Sato, Takahashi e Kurauchi (1999).

Quando o polipropileno a ser reciclado é de origem pós-consumo, ou seja, são diversos produtos de origens diferentes extrusados juntos, as cores que são incorporadas aos plásticos pela utilização de pigmentos se misturam entre cores claras e cores escuras e para uniformizar são incorporados outros pigmentos no processo de extrusão, em busca da uniformização dos *pellets* (Brognoli, 2006), como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Pellets de polipropileno reciclado.



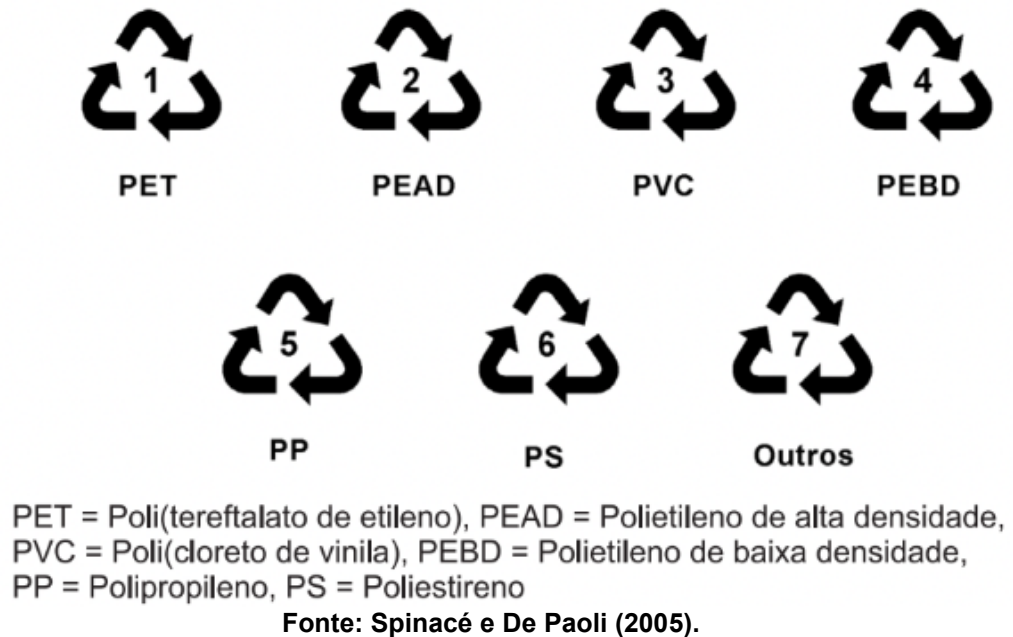
Fonte: Autoria Própria (2023).

A etapa de separação é indispensável, pois a presença de partículas contaminantes (vidro, papel, metal ou outros polímeros), mesmo em concentrações pequenas, pode alterar as propriedades do polímero reciclado. A separação pode ser feita com auxílio da identificação da simbologia contida no produto acabado (Figura 9) e/ou a utilização de testes simples, como o de odor dos vapores por meio da queima,

aparência da chama, temperatura de fusão e solubilidade, os quais são baseados em suas características físicas e de degradação térmica, que são distintas (Spinacé; De Paoli, 2005).

Levando em consideração a existência de diversos tipos de polímeros que podem ser descartados juntamente com o polipropileno, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou a NBR 13.230 “Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis – Identificação e simbologia”, que é sistema de codificação e separação mais rápida dos resíduos, pois os produtos possuem esse símbolo de identificação, como se pode observar na Figura 9.

Figura 9 – Sistema de identificação de plásticos ABNT.



2.3 Polipropileno Reciclado: propriedades, produção e aplicações

O polipropileno reciclado (PPr), objeto de estudo deste trabalho, é proveniente de resíduos pós-consumo de diversas origens, a partir de reciclagem mecânica secundária. A sua reaplicação estimula a economia circular, em que os materiais são reutilizados e reintroduzidos no ciclo produtivo o que contribui ainda mais para um processo sustentável. A produção de polímeros recicláveis reduz a extração e exploração dos recursos naturais não renováveis, minimiza a poluição e acúmulo de resíduos plásticos em lixões, aterros ou em outros locais inapropriados.

Lyu *et al.* (2023) abordaram que houve um aumento considerável no uso de máscaras faciais de polipropileno nos últimos anos e o gerenciamento de resíduos desse artigo tornou-se uma preocupação global, uma vez que o atual sistema de gestão de resíduos é insuficiente. Apresentam uma visão geral de vários métodos desenvolvidos recentemente para reciclagem de resíduos plásticos, e oferecem estratégias e recomendações prospectivas sobre a gestão de resíduos plásticos de máscaras faciais. Os autores desenvolveram uma orientação sobre como aproveitar as complexidades dos resíduos de máscaras faciais e outras questões de poluição por plásticos médicos, bem como melhorar as deficiências e ineficiências do atual sistema de gestão de resíduos no combate ao crescente problema dos resíduos plásticos.

A versatilidade do polipropileno inclui sua capacidade de ser reciclado e reaproveitado, embora algumas propriedades mecânicas permaneçam semelhantes ao plástico original, outras como a resistência ao impacto pode ser reduzida após sucessivas reciclagens (Barbosa; Piaia; Ceni, 2017).

A fim de reciclar resíduos de polipropileno em grânulos de alta qualidade, a mudança no índice de fluidez durante a reciclagem deve ser a menor possível para que o polímero reciclado tenha propriedades de fluidez muito semelhantes ao do polímero virgem (Bajaj; Sharma, 1997).

O polipropileno reciclado, tem como características em relação ao polímero virgem, menor viscosidade e cristalinidade, além do aumento do módulo elástico e da tensão de escoamento. Além disso, o alongamento e a tenacidade à fratura diminuem. O polipropileno reciclado mantém características de resistência química, facilidade de moldagem e é atóxico (Rodrigues, 2020).

La Mantia (1996) afirma que como para todos os polímeros, os principais problemas na reciclagem do polipropileno decorrem da fácil degradabilidade desse polímero tanto durante sua vida útil (foto-oxidação) e nas operações de processamento e reciclagem. Os principais efeitos da degradação na estrutura do polipropileno são diminuição da massa molar, mudança da distribuição de massa molar (DMM) e a oxidação das cadeias poliméricas devido ao ataque do oxigênio do meio externo ao carbono terciário ou secundário, gerando grupos de carbonila (cetonas e aldeídos) (Nasir; Yasin; Islam, 2010). Como consequência dessas mudanças estruturais, há a alteração da morfologia, que afeta as propriedades mecânica, elétrica, reológica etc. (La Mantia, 1999).

La Mantia (1999) compara o índice de fluidez (MFI) em amostras de polipropileno em função do número de processamentos (extrusão e moldagem). No estudo observaram que o índice de fluidez aumenta drasticamente conforme o número de processos, sugerindo uma redução do peso molecular decorrentes das cisões das cadeias moleculares. O aumento significativo do índice de fluidez nas amostras submetidas a extrusão pode ser atribuído a condições de processamentos mais severas ou a maiores tensões mecânicas.

Wang *et al.* (2023) investigaram a incorporação de fibras de polipropileno no concreto agregado, em busca do melhoramento das propriedades físicas. Os autores apontam que a fibra de polipropileno tem sido amplamente utilizada em concreto nos últimos anos devido ao seu alto desempenho de custos, não absorve água, baixo peso e excelente resistência à corrosão. A pesquisa revelou que a resistência à compressão aumenta inicialmente e depois diminui com o aumento do volume e da proporção de polipropileno, além de que propõe uma modificação na curva de tensão-deformação para concreto agregado com fibra de polipropileno.

Spadetti *et al.* (2017) investigaram as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de polipropileno reciclado e virgem, reforçados com até 40% em peso de fibras de celulose, bem como a morfologia da matriz polimérica. Por meio caracterização das amostras, os compósitos produzidos com a matriz reciclada e reforçados com fibras de celulose possuem propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas, muito semelhantes aos produzidos com a matriz virgem de polipropileno.

Com base nos exemplos citados acima, a reciclagem de polipropileno assim como a caracterização das propriedades térmicas, físicas e químicas do polipropileno reciclado se faz extremamente necessária para melhor compreender seu comportamento, possibilitando identificar as modificações em relação ao polipropileno virgem e analisar as aplicações têxteis onde a matéria-prima reciclada pode ser adequada.

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

Os polímeros utilizados foram o polipropileno virgem (PPv), Figura 10, denominado de SUMITOMO® Polypropylene Y101, se trata de um homopolímero da marca Sumitomo Chemical Asia.

Figura 10 – Polipropileno virgem PPv.



Fonte: Aatoria Própria (2023).

Na Tabela 2 é possível identificar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas do polipropileno virgem (PPv), fornecidas pela Sumitomo Chemical Asia.

Tabela 2 – Propriedades do SUMITOMO Polypropylene Y101.

Propriedades	Valor
Índice de Fluidez MFI (g/10min)	15
Densidade (g/cm³)	0,9
Resistência a Tração no Rendimento (MPa)	34
Resistência a Tração a Quebra (MPa)	38
Módulo Flexural (MPa)	1.700
Resistência ao Impacto com entalhe Izod, 23°C (kJ/m²)	2
Temperatura de Fusão (°C)	160-240

Fonte: Adaptado de Sumitomo Chemical Asia (2022).

O polipropileno reciclado (PPr) utilizado foi concedido pela Associação Fibrenamics proveniente de uma empresa recicladora de plásticos de Guimarães, Portugal, sendo formado por resíduos de polipropileno pós-consumo que não passaram pela etapa de reprocessamento, como pode ser observado na Figura 11. Este material encontra-se moído e é denominado como *pellets*.

Figura 11 – Polipropileno reciclado PPr.



Fonte: Autoria Própria (2023).

3.2 Métodos

A metodologia seguirá as seguintes etapas: caracterização dos polímeros, extrusão dos filamentos e caracterização dos filamentos, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Quadro de métodos.

<p>1 CARACTERIZAÇÃO DOS POLÍMEROS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Termogravimetria (TGA); • Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC); • Difração de Raio-X (DRX).
<p>2 PRODUÇÃO DOS FILAMENTOS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Extrusão de cinco tipos de filamentos com diferentes proporções de incorporação de polipropileno virgem e reciclado.
<p>3 CARACTERIZAÇÃO DOS FILAMENTOS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Termogravimetria (TGA); • Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC); • Difração de Raio-X (DRX); • Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR); • Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Fonte: Autoria Própria (2023).

3.2.1 Caracterização dos polímeros

Neste capítulo apresentam-se as principais técnicas de caracterização de polímeros utilizadas para analisar o comportamento e propriedades térmicas, físicas e químicas do polipropileno virgem (PPv) e polipropileno reciclado (PPr), as quais são: Análise Termogravimétrica (TGA), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Difração de Raio-X (DRX).

3.2.1.1 Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos polímeros

A análise termogravimétrica permite conhecer os efeitos do aquecimento no material, como a temperatura em que começam a se decompor, acompanhar o andamento de reações de desidratação, oxidação, combustão e decomposição dependendo da atmosfera em que ocorrem (Ionashiro, 2004).

A análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) avalia a pureza do composto por meio de uma análise do pico de fusão obtido e aponta a depreciação do ponto de fusão do composto puro devido à presença de impurezas (Van Dooren, 1984).

Michell e Müller (2016) citam que as propriedades como capacidade térmica, temperatura de transição vítrea, temperatura de cristalização e temperatura de fusão caracterizam os materiais poliméricos, esses dados podem ser obtidos a partir da curva do ensaio de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), sendo então uma técnica muito importante no estudo de polímeros.

Os ensaios foram realizados no equipamento STA7200RV Hitachi (Figura 13), o qual operou em temperaturas entre 30 e 1.000°C, com a utilização de cadinhos de alumina, com massa de amostra entre 5 e 10 mg em atmosfera de nitrogênio (200 ml/min), com gradiente de aquecimento 20°C/min. O equipamento pertence ao Laboratório de Análise Avançada de Materiais localizado no Departamento de Engenharia Têxtil, bloco C da Escola de Engenharia da Universidade do Minho (UMinho) – Campus Azúrem, Guimarães, Portugal.

Figura 13 – Equipamento análise Termogravimétrica.



Fonte: Aatoria Própria (2023).

As amostras de PPv com aproximadamente 5,8 mg e a de PPr com 6,2 mg foram submetidas ao ensaio como pode-se observar na Figura 14, no equipamento onde são posicionadas as amostras nos devidos cadinhos de alumina (circulados em vermelho).

Figura 14 – Cadinhos de alumina.



Fonte: Aatoria Própria (2023).

Com os dados obtidos da análise DSC é possível determinar o grau de cristalinidade (X_c), por meio da Equação 1, que é determinada entre a razão da entalpia de fusão da amostra (ΔH_f), pela entalpia de fusão do polipropileno 100% cristalino (ΔH_f°). O cálculo ocorreu com $\Delta H_f^\circ=209$ J/g como entalpia de fusão do PP 100% cristalino (Ramos; Costa, 2007; Karger-Kocsis, 1995).

Equação 1 - Grau de cristalinidade X_c .

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100 \quad (1)$$

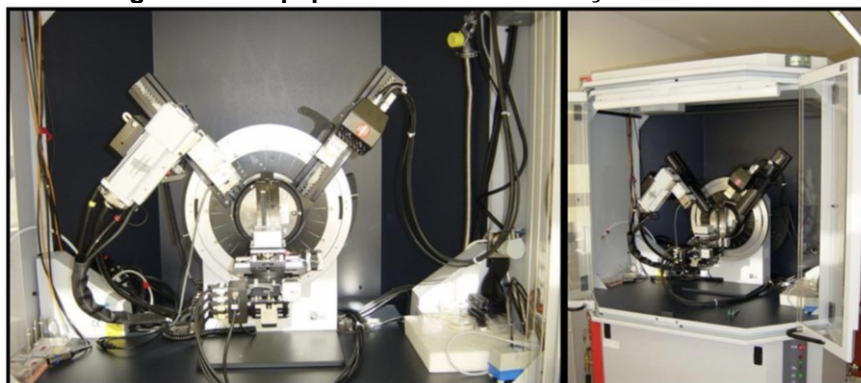
3.2.1.2 Difração de Raio-X (DRX) dos polímeros

Bhadra e Khastgir (2008) afirmam que os polímeros cristalinos e semicristalinos são formados por duas fases distintas. A fase na qual as cadeias poliméricas estão organizadas, é definida como região cristalina, enquanto a fase em que as cadeias não estão organizadas e não possuem alinhamento paralelo, é definida como a região amorfa. O arranjo ordenado das cadeias poliméricas da fase cristalina depende da natureza do polímero e pode ser estudado por difração de raio-x.

Essa técnica é utilizada para mensurar a cristalinidade dos materiais e o difratograma obtido no final do ensaio não destrutivo pode ser dividido em duas áreas distintas, uma relativa a cristalinidade e a outra ao halo amorfo (ROE, 1985).

Os testes de Difração de Raio-X (DRX) foram realizados no Equipamento Bruker D8 Discover (Figura 15), seu gerador de raio-X possui potência máxima de 3 kW, voltagem de 20-60 kV e corrente entre 10-60 mA, além de possuir alinhamento goniométrico de 0.0001° com varredura 2θ faixa angular de -110° a 168° e ânodo de cobre.

Figura 15 – Equipamento análise Difração de Raio-X.



Fonte: SEMAT UMinho (2023).

Esta análise foi realizada no Laboratório de Serviço de Caracterização de Materiais (SEMAT) localizado no Departamento de Física da Escola de Ciências da UMinho – Campus Azúrem. As amostras em *pellets* de PPv e PPr foram analisadas em varreduras de 5 a 50° em 2θ com passo de $0,02^\circ/s$.

3.2.2 Produção dos filamentos

Para a produção dos filamentos, os *pellets* devem estar livres de qualquer quantidade excessiva de água para serem processados, sendo necessário o processo de secagem ou cristalização. A secagem permite processar polímeros com qualidade mecânica, evitando-se falha prematura pela ação da hidrólise provocada pela água durante o processo de fiação. Mesmo a secagem não sendo exigida para o polipropileno, pois se trata de um polímero da classe das poliolefinas, que não são materiais higroscópicos, ou seja, não absorvem umidade (Almeida; Souza, 2015), devido as diferentes condições de armazenamento entre o polipropileno virgem e o polipropileno reciclado, realizou-se uma secagem prévia para uniformização das condições e características dos polímeros.

A secagem foi realizada em uma estufa (ULE-700, Memmert) como pode ser visto na Figura 16, a 60 ± 2 °C por 12 horas, situada no Centro para a Valorização de Resíduos (CVR) da UMinho – Campus Azúrem.

Figura 16 – Estufa.

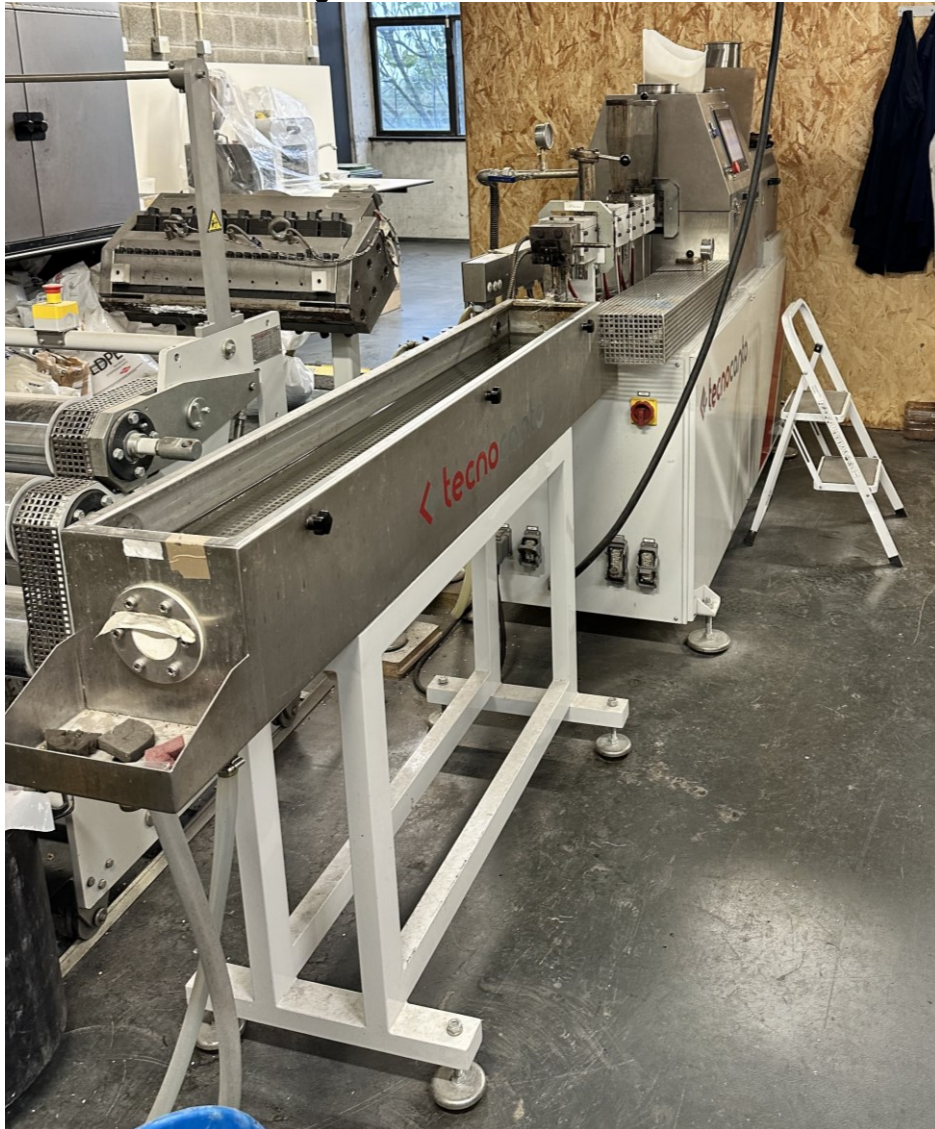


Fonte: Autoria Própria (2023).

Com o auxílio de uma balança, foram pesados 250 g de material para cada processo, as proporções de cada polipropileno estão descritas no Quadro 1.

Em seguida, iniciou-se o processo de extrusão dos filamentos em uma extrusora (Figura 17) caracterizada como dupla rosca e de co-rotação, ou seja, os parafusos internos têm o movimento para o mesmo sentido, localizada também no CVR da UMinho – Campus Azúrem.






Figura 17 – Extrusora bifuso.



Fonte: Autoria Própria (2023).

A produção dos filamentos foi dividida em cinco processos com diferentes proporções de incorporação, como pode ser visto no Quadro 1, assim como as proporções de massa e respectivas imagens dos polímeros no alimentador da extrusora.

Quadro 1 – Produção dos filamentos.

Processo	Filamento	Proporções de incorporação	Proporções de massa (g)	Polímero no alimentador
1	PPv	100% polipropileno virgem	250	
2	PPr	100% polipropileno reciclado	250	
3	30/70	30% polipropileno virgem – 70% polipropileno reciclado	75 – 175	
4	50/50	50% polipropileno virgem – 50% polipropileno reciclado	125 – 125	
5	70/30	70% polipropileno virgem – 30% polipropileno reciclado	175 – 75	

Fonte: Autoria Própria (2023).

Na Tabela 3 apresentam-se as temperaturas (T_z) de cada uma das seis zonas de aquecimento da extrusora, responsáveis pela fusão do material durante o processamento no equipamento.

Tabela 3 – Temperaturas das zonas de aquecimento.

T_{z1} (°C)	T_{z2} (°C)	T_{z3} (°C)	T_{z4} (°C)	T_{z5} (°C)	T_{z6} (°C)
180	180	170	155	150	138

Fonte: Autoria Própria (2023).

3.2.3 Caracterização dos Filamentos

A caracterização dos filamentos é parte fundamental para este trabalho, nessa etapa foi analisado propriedades térmicas, físicas e químicas dos cinco filamentos produzidos na etapa anterior. Foram realizadas as seguintes análises: Análise Termogravimétrica (TGA), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), Difração de Raio-X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.2.3.1 Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos filamentos

A Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) foi feita nos filamentos com diferentes proporções de incorporação de polipropileno virgem e reciclado, ou seja, o filamento 30/70, 50/50 e 70/30, realizada no Equipamento STA7200RV Hitachi (Figura 13), o qual pode operar em temperaturas entre 30 e 1.000°C, com a utilização de cadinhos de alumina, com massa de amostra entre 5 e 10 mg em atmosfera de nitrogênio (200 ml/min), pertencente ao Laboratório de Análise Avançada de Materiais localizado no Departamento de Engenharia Têxtil, bloco C da Escola de Engenharia da UMinho - Campus Azúrem.

Os parâmetros utilizados para realização das análises termogravimétricas nos filamentos com diferentes proporções de polipropileno virgem e polipropileno reciclado foram temperatura inicial de 30 °C e temperatura final de 1.000 °C e com gradiente de aquecimento 20 °C/min.

3.2.3.2 Difração de Raio-X (DRX) dos filamentos

Esta análise de Difração de Raio-X (DRX) foi realizada nos filamentos com mistura de polipropileno virgem e reciclado, realizada no Equipamento Bruker D8 Discover. O gerador de raio-X possui potência máxima de 3 kW, voltagem de 20-60 kV e corrente entre 10-60 mA, além de possuir alinhamento goniométrico de 0.0001° com varredura 2θ faixa angular de -110° a 168° e ânodo de cobre, pelo Laboratório do SEMAT localizado no Departamento de Física da Escola de Ciências da UMinho – Campus Azúrem. Os valores de processamento das amostras 30/70, 50/50 e 70/30 foram varreduras de 5 a 50° em 2θ com passo de $0,02^\circ/s$.

3.2.3.3 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos filamentos

De acordo com Barbieri *et. al* (2013) na análise de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) o feixe é incidido na amostra e pode causar uma vibração rotacional ou translacional nas ligações químicas entre os elementos presentes na composição do material. Cada ligação química vibra em uma frequência específica característica, possibilitando caracterizar o material e, em seguida, é feita a leitura do feixe por um receptor, que de acordo com a transmissão ou absorção, medida da intensidade e forma da interação, é possível investigar os grupos químicos presentes nas amostras por meio dos espectros obtidos para materiais diversos, incluindo polímeros (Silverstein, 2019).

A análise FTIR foi realizada em um Espectrômetro IRAffinity-1S FTIR (Figura 18), pertencente ao Laboratório de Análise Avançada de Materiais localizado no Departamento de Engenharia Têxtil, bloco C da Escola de Engenharia da UMinho – Campus Azúrem.

Figura 18 – Espectrômetro Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Os parâmetros adotados foram número de varreduras igual a 45, com resolução de 8 cm^{-1} em uma faixa do espectro de $400 - 4.000 \text{ cm}^{-1}$, a análise seguiu os mesmos valores para os cinco filamentos extrusados na etapa anterior.

3.2.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV), é capaz de fornecer a observação e análise das características microestruturais de materiais sólidos. Trata-se de um tipo de microscópio utilizado para a caracterização e análise da microestrutura de amostras, além de gerar imagens com aspecto tridimensional e com alta resolução (Dedavid; Gomes; Machado, 2007).

Esta análise foi realizada no equipamento NanoSEM – FEI Nova 200 (Figura 19), pelo Laboratório de Serviço de Caracterização de Materiais (SEMAT) localizado no Departamento de Física da Escola de Ciências da UMinho – Campus Azúrem.

As morfologias dos filamentos foram avaliadas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) com objetivo de avaliar os aspectos físicos e relacionar o aspecto da fratura com a compatibilização do polipropileno virgem e reciclado. As amostras foram fraturas em nitrogênio líquido e analisadas.

Figura 19 – Equipamento análise Microscopia Eletrônica de Varredura.



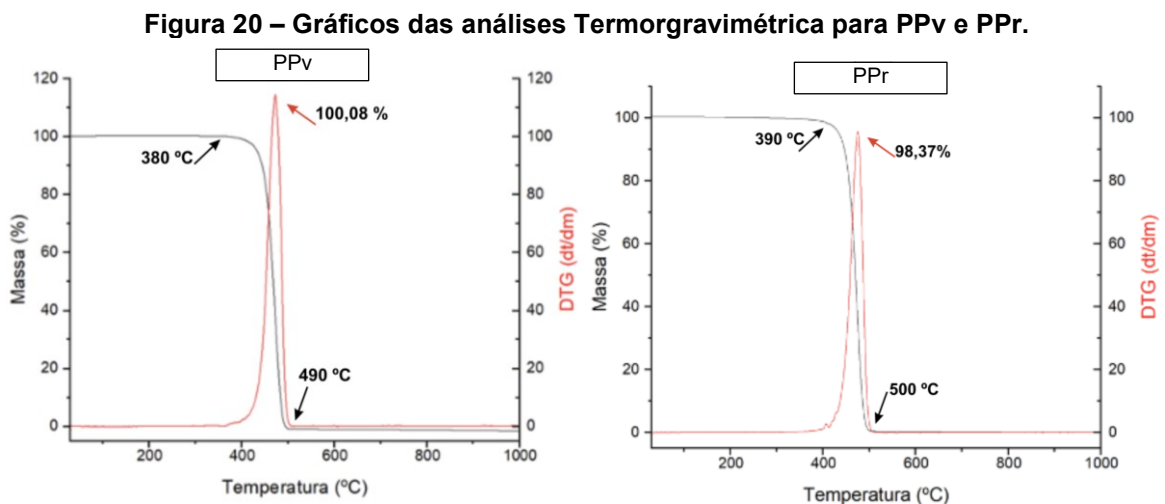
Fonte: SEMAT UMinho (2023).

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização dos Polímeros

4.1.1 Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos polímeros

A estabilidade térmica dos polímeros foi avaliada pela análise termogravimétrica, como pode ser observado nas Figura 20, que apresentam as curvas de TGA e DTG obtidas para PPv e PPr. As análises TGA e DTG representam a porcentagem de perda de massa enquanto a amostra é aquecida a uma velocidade de aquecimento constante, evidenciando o comportamento térmico dos polímeros.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Com base na observação das curvas de termogravimetria (TGA) obtidas para as amostras, pode-se notar que houve apenas um estágio de decomposição, sendo que o início da degradação (T_{id}) para o PPv ocorreu a partir de 380 °C e terminou em torno de 490 °C, enquanto o PPr possui temperatura de início de degradação (T_{id}) em 390 °C e a temperatura máxima de degradação final (T_m) aproximadamente em 500°C.

Na Tabela 4 identifica-se as temperaturas do inicial (T_{id}), máxima da degradação (T_m) e a porcentagem de perda de massa (% p_m).

Tabela 4 – Resultados das análises Termogravimétrica para PPv e PPr.

	PPv	PPr
T_{id} (°C)	380	390
T_m (°C)	490	500
% pm	100,08	98,37

Fonte: Autoria Própria (2023).

Na curva TG tem-se que a porcentagem de massa residual do PPv, resultante da análise termogravimétrica foi de 100,08%, indicando que houve a degradação total do material nestas condições de análise. A porcentagem de massa residual do PPr na mesma faixa de temperatura de processamento foi de 98,37%, esse valor pode indicar a presença de outros materiais no PPr que não se degradaram durante a análise.

Tais comportamentos já eram esperados e possuem semelhanças com os resultados encontrados no estudo de Madi (2013), que avaliou as propriedades térmicas de uma mistura de polietileno reciclado e polipropileno virgem com diferentes proporções em massa de polipropileno e observou que as análises termogravimétricas TGA apresentaram apenas um estágio de decomposição, característico das poliolefinas, em que a decomposição completa do material ocorreu em torno de 500°C, correspondendo a 95% da perda de massa da mistura.

Os dados presentes na literatura apontam que a temperatura máxima de degradação é de 500°C para o polipropileno virgem e, ao comparar com os valores obtidos é possível perceber que as temperaturas encontradas para as amostras de polipropileno virgem e reciclado são próximas, ou seja, a estabilidade térmica não foi afetada de forma significativa (Vassiliou *et al.* 2008).

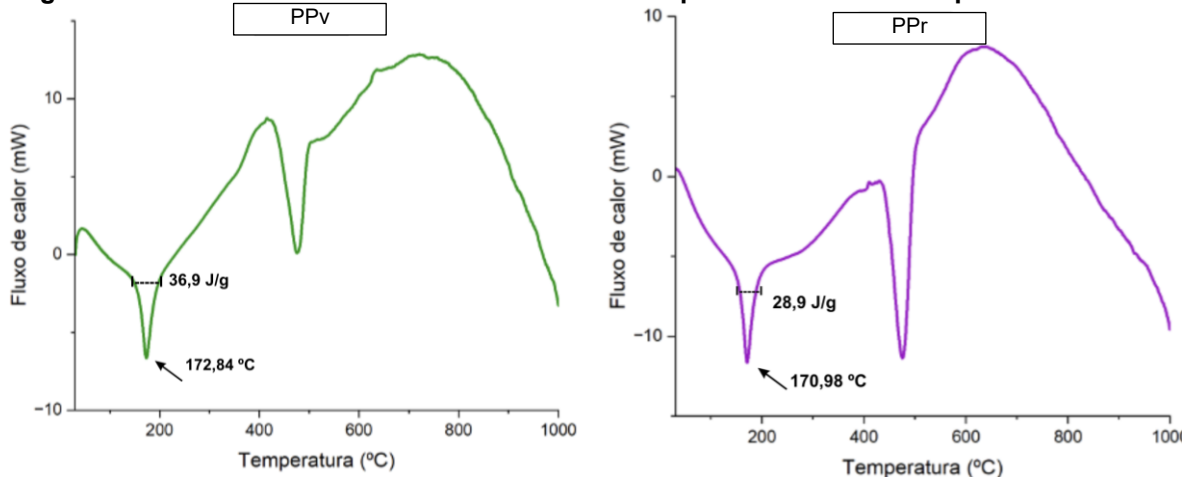
Além dessas informações, a análise permite identificar os picos de entalpia que definem a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) como pode ser visto na Figura 21.

O conhecimento dos valores de temperatura de degradação das duas amostras é útil para o processamento, uma vez que na extrusão deve atingir temperaturas elevadas, mas sem ultrapassar a temperatura de degradação de modo que as propriedades dos polímeros sejam conservadas.

A temperatura de fusão (T_f) é o valor médio da faixa de temperatura em que, durante o aquecimento, promove o desaparecimento das regiões cristalinas com a

fusão dos cristalitos, as T_f encontradas nessa análise foram 172,84 °C e 170,98 °C para o polipropileno virgem e reciclado, respectivamente.

Figura 21 – Gráficos das análises de Calorimetria Exploratória Diferencial para PPv e PPr.



Fonte: Autoria Própria (2023).

O grau de cristalinidade de um polímero está relacionado com a massa molar, tanto da estrutura da cadeia e quanto do processo físico pelo qual é sujeito. Quanto maior a cristalinidade, resulta em aumento da densidade, rigidez e resistência térmica, enquanto as regiões amorfas de um polímero contribuem para a elasticidade, maciez e flexibilidade (Alexander, 1969).

Na Tabela 5 encontram-se os valores de entalpia de fusão (ΔH_f) das amostras, temperaturas de fusão (T_f) respectivas e o grau de cristalinidade (X_c) de cada uma delas.

Tabela 5 – Resultados das análises de Calorimetria Exploratória Diferencial para PPv e PPr.

	ΔH_f (J/g)	T_f (°C)	X_c (%)
PPv	36,9	172,84	22,36
PPr	28,9	170,98	17,51

Fonte: Autoria Própria (2023).

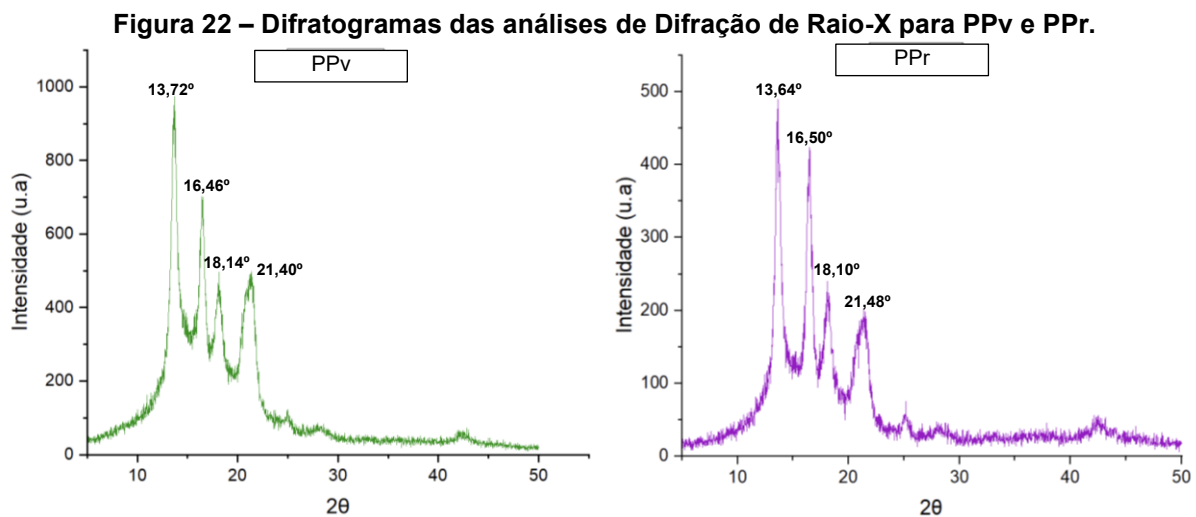
Stoian *et al.* (2019) obtiveram que o grau cristalinidade para o PP virgem foi de 35% e para o PP reciclado de 29%. Analisaram que tal fenômeno pode ter ocorrido devido a quantidade muito pequena de aditivos no PP virgem, como agentes estabilizantes, diferente do que ocorre para PP reciclado, que por se tratar de uma mistura de PP com diversas origens, pode conter uma quantidade maior destes agentes. Os resultados expostos na Tabela 5, estão de acordo com este estudo, uma

vez que o polipropileno reciclado apresentou 17,51% do grau de cristalinidade e o polipropileno virgem de 22,36%.

Ao observar que o polipropileno reciclado tem menor grau de cristalinidade (X_c) e entalpia de fusão (ΔH_f) em relação aos valores obtidos pelo polipropileno virgem, confirma que o processo de reciclagem afeta as características de cristalinidade do polipropileno, entretanto os valores são próximos o que possibilita a viabilidade do polipropileno reciclado em aplicações têxteis.

4.1.2 Difração de Raio-X (DRX) dos polímeros

Na Figura 22 observa-se os difratogramas da análise DRX das amostras de polipropileno virgem e reciclado, respectivamente.



Fonte: Autoria Própria (2023).

As amostras apresentaram picos nos seguintes graus em 2θ apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Resultados das análises de Difração de Raio-X para PPv e PPr.

PPv 2θ	PPr 2θ
13,72°	13,64°
16,46°	16,50°
18,14°	18,10°
21,40°	21,48°

Fonte: Autoria Própria (2023).

É possível observar que tanto o PPv quanto o PPr apresentaram picos em graus e planos muito próximos em 2θ . Resultados semelhantes foram encontrados por Morais *et al.* (2021) que identificaram no difratograma de DRX do filamento de PP com picos em 2θ nos graus 14° , 17° , $18,5^\circ$ e $21,8^\circ$, com intuito de avaliar o nível de cristalinidade do filamento e como isso influencia no seu desempenho.

Assim como Husin *et al.* (2017) analisaram a difração de raio-x (DRX) em blendas de polipropileno reciclado preparadas por extrusão em rosca simples, com o objetivo de identificar a influência na estrutura cristalina dos materiais, e apontaram-se picos em 2θ em $14,02^\circ$, $16,74^\circ$, $18,5^\circ$ e $21,6^\circ$ para o PP reciclado.

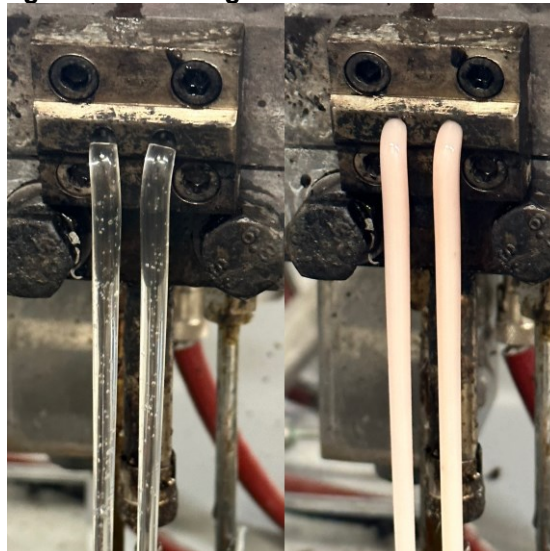
Ambas as amostras apresentaram picos em 2θ muito semelhante, que são característicos de cristalinidade do polipropileno, indicando que o processo de reciclagem do polipropileno não afetou consideravelmente a cristalinidade.

4.2 Produção dos Filamentos

Quando as massas poliméricas fundidas passaram pelos dois orifícios com dimensão de 4 mm da fieira, ocorreram a formação de dois filamentos que se uniram e formaram monofilamentos.

Na Figura 23 é possível visualizar ao lado esquerdo o processo 1 (PPv- 100% polipropileno virgem), e ao lado direito o processo 2 (PPr – 100% polipropileno reciclado), momento em que polímero fundido passa pela fieira ocorre a formação dos monofilamentos.

Figura 23 – Passagem do PPv e PPr na fieira.



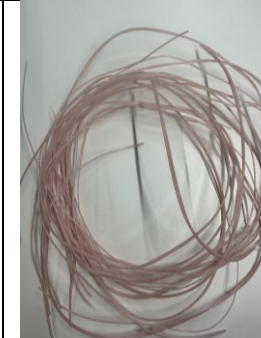
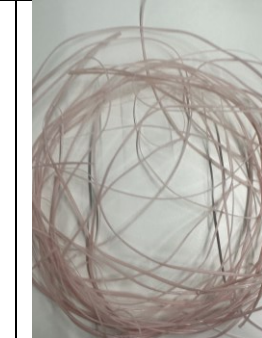



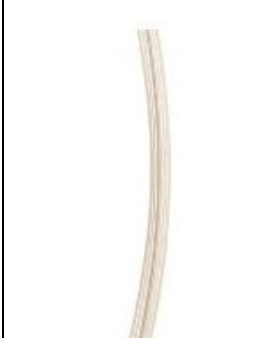
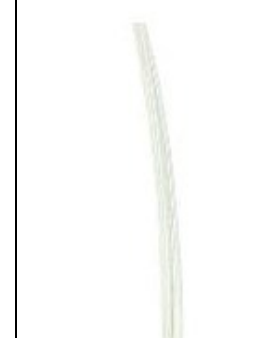
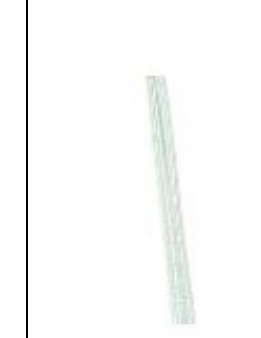


Fonte: Autoria Própria (2023).

Em seguida, estes dois filamentos extrusados se unem e são arrefecidos em um tanque com água a temperatura ambiente de aproximadamente 25°C. Este processo foi realizado e repetido na ordem apresentada no Quadro 1.

Como resultados da produção dos filamentos com diferentes proporções de incorporação de PPv e PPr, pode-se visualizar no Quadro 2, os monofilamentos formados no processo.

Quadro 2 – Filamentos produzidos.

Filamentos				
100% PPv	100%PPr	30/70 30% PPv-70% PPr	50/50 50% PPv-50% PPr	70/30 70% PPv-30% PPr
				
				

Fonte: Aatoria Própria (2023).

Como primeiro resultado aparente, após análise visual, a coloração dos filamentos extrudados varia conforme a porcentagem de polipropileno virgem e/ou reciclado incorporados na extrusão. Primeiramente o PPv apresentou aspecto totalmente vítreo devido ser 100% polipropileno virgem, já o PPr possui coloração rosa mais escuro e aspecto mais opaco por ser 100% polipropileno reciclado. Os filamentos

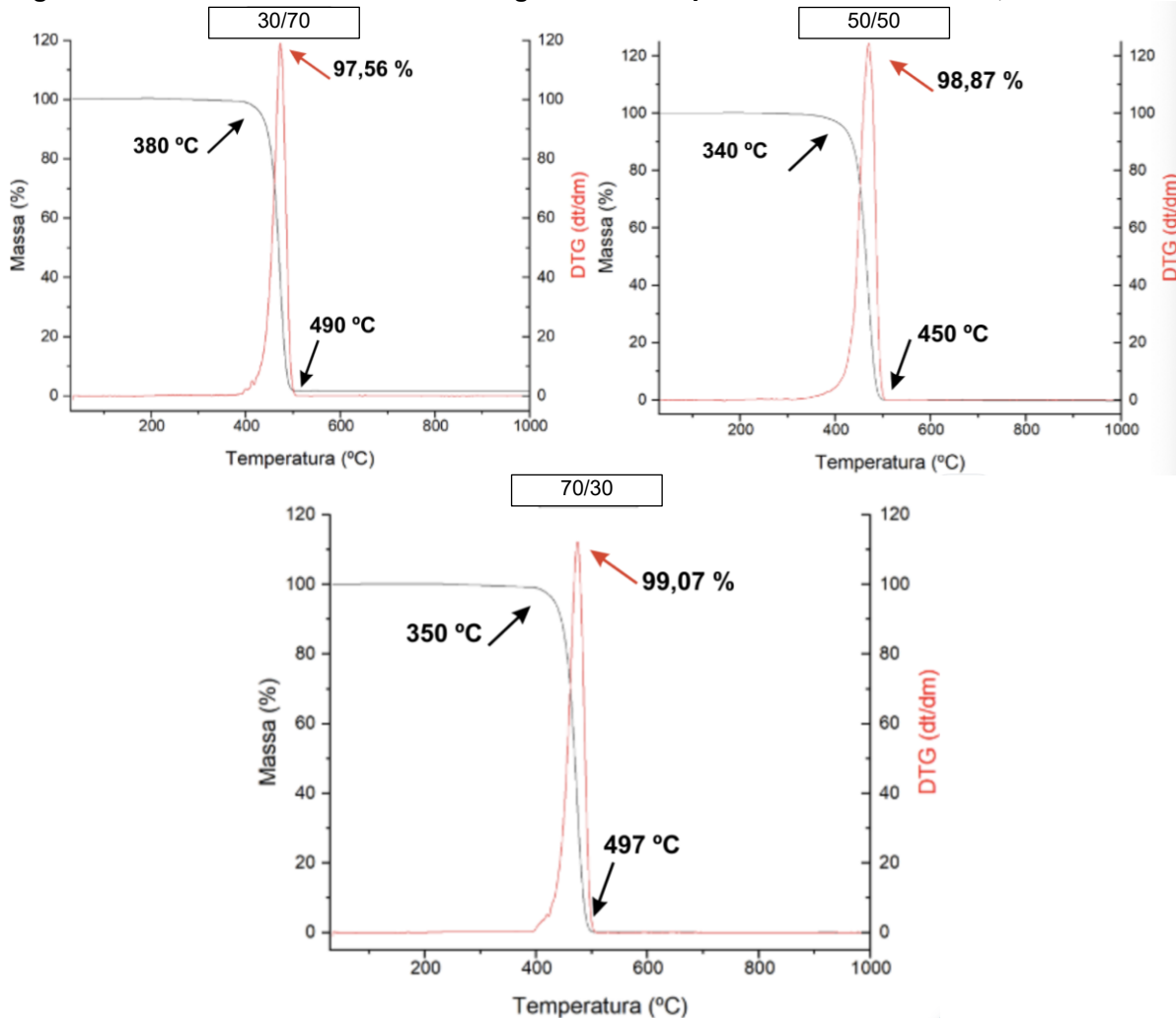
30/70, 50/50 e 70/30 apresentaram colorações rosadas, mas em menor intensidade do que o PPr pela presença de PPv na composição, porém a intensidade da cor rosa e opacidade diminuem conforme o aumento de PPv na mistura.

4.3 Caracterização dos Filamentos

4.3.1 Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) dos filamentos

Nas Figura 24 pode-se identificar os gráficos obtidos nas análises termogravimétricas dos filamentos com proporção 30/70, 50/50 e 70/30, respectivamente.

Figura 24 – Gráficos das análises Termogravimétricas para os filamentos 30/70, 50/50 e 70/30.



Fonte: Autoria Própria (2023).

As curvas de termogravimetria (TGA) das análises das três amostras, exibem que o início da degradação (T_{id}) e temperatura máxima de degradação (T_m) para o

filamento com proporção 30/70 está apresentou entre 380°C e 490°C, o com 50/50 possui temperatura de início de degradação (T_{id}) em 340°C e a temperatura máxima de degradação final (T_m) aproximadamente em 450°C, e por fim o com proporção 70/30 apresentou início da degradação a partir de 350°C e se findou-se em 497°C.

A Tabela 7 apresenta as temperaturas inicial e máxima da degradação e a porcentagem de perda de massa ($\%_{pm}$) de cada filamento, e para fins de comparação foram incluídos os dados dos polímeros PPv e PPr.

Tabela 7 – Resultados das análises Termogravimétricas para os filamentos 30/70, 50/50 e 70/30.

	PPv	PPr	30/70	50/50	70/30
T_{id} (°C)	380	390	380	340	350
T_m (°C)	490	500	490	450	497
$\%_{pm}$	100,08	98,37	97,56	98,87	99,07

Fonte: Autoria Própria (2023).

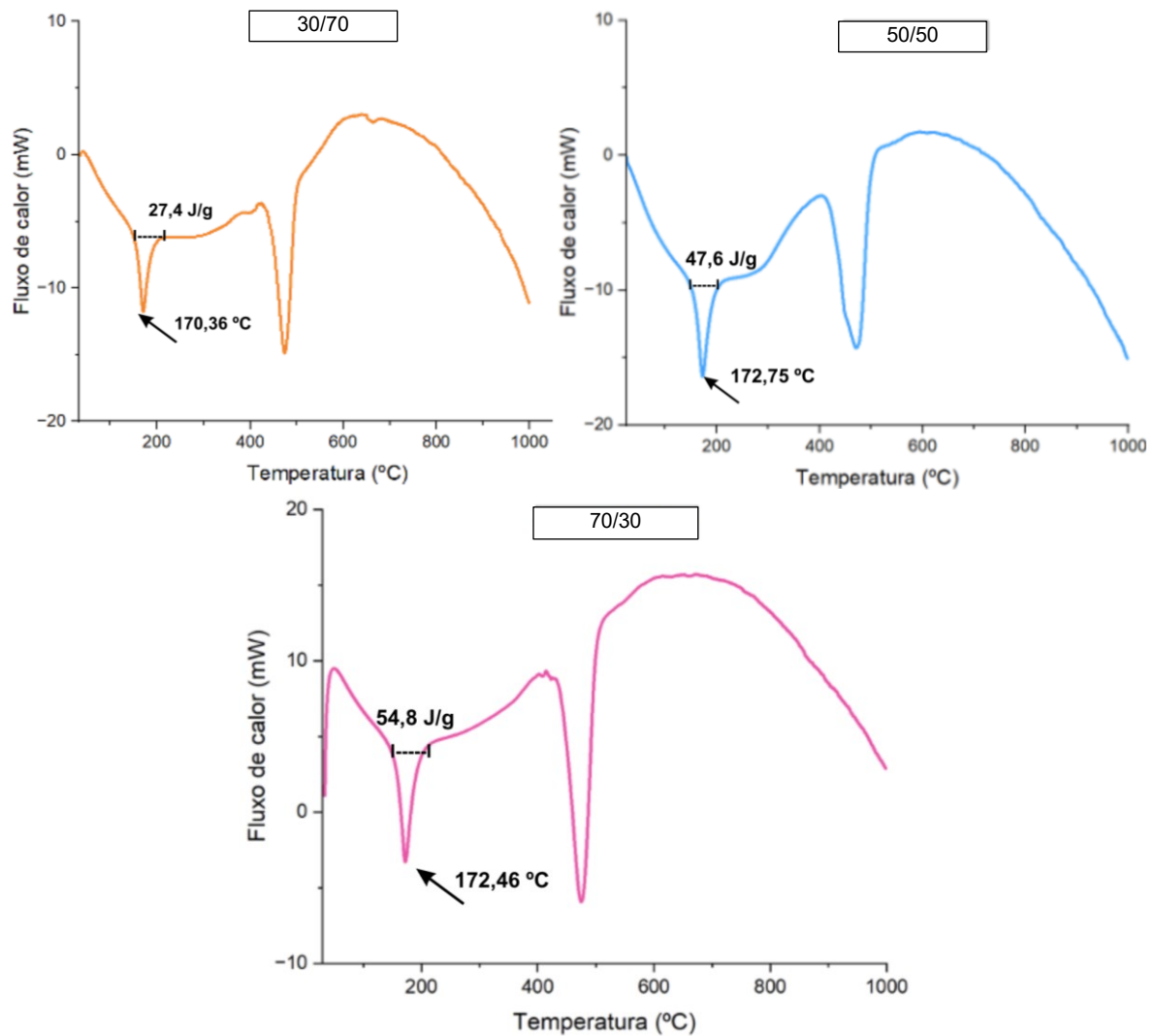
É possível identificar que o filamento com proporção 30/70 possui T_{id} e T_m idênticas aos valores encontrados para o polipropileno virgem, o que aponta inalteração nas propriedades térmicas do material nesta proporção, entretanto a temperatura inicial de degradação é menor nas amostras com proporções de incorporação 50/50 e 70/30, indicando que essas porcentagens de mistura interferem na estabilidade térmica dos filamentos.

Em relação temperatura máxima de degradação, o filamento 50/50 apresenta a menor em comparação com as outras amostras, indicando novamente que a taxa de mistura 50/50 interfere nas propriedades térmicas do polipropileno, e o filamento 70/30 possui T_m entre os valores obtidos para o PPv e PPr, o que não aponta alteração significativa.

Como pode ser observado nos dados apresentados, os filamentos que foram extrudados com PPr, não atingiram 100% da perda de massa, uma vez que a decomposição do PPr apresentou $\%_{pm}$ igual a 98,37%. Ainda, nota-se que quanto maior a proporção de PPr no filamento, menor é a perda de massa do polímero, estes resultados podem apontar a presença de outros materiais no PPr, que não se degradaram na faixa de temperatura da análise.

Na Figura 25, é possível observar picos de entalpia das amostras com proporções 30/70, 50/50 e 70/30 nas curvas que determinam a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).

Figura 25 – Gráficos das análise de Calorimetria Exploratória Diferencial para os filamentos 30/70, 50/50 e 70/30.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Na Tabela 8 é possível identificar os valores de entalpia de fusão (ΔH_f) e temperaturas de fusão cristalina (T_f) de cada uma das três amostras.

Tabela 8 – Resultados das análises de Calorimetria Exploratória Diferencial para os filamentos 30/70, 50/50 e 70/30.

	ΔH_f (J/g)	T_f (°C)
PPv	36,9	172,84
PPr	28,9	170,98
30/70	27,4	170,36
50/50	47,6	172,75
70/30	54,8	172,46

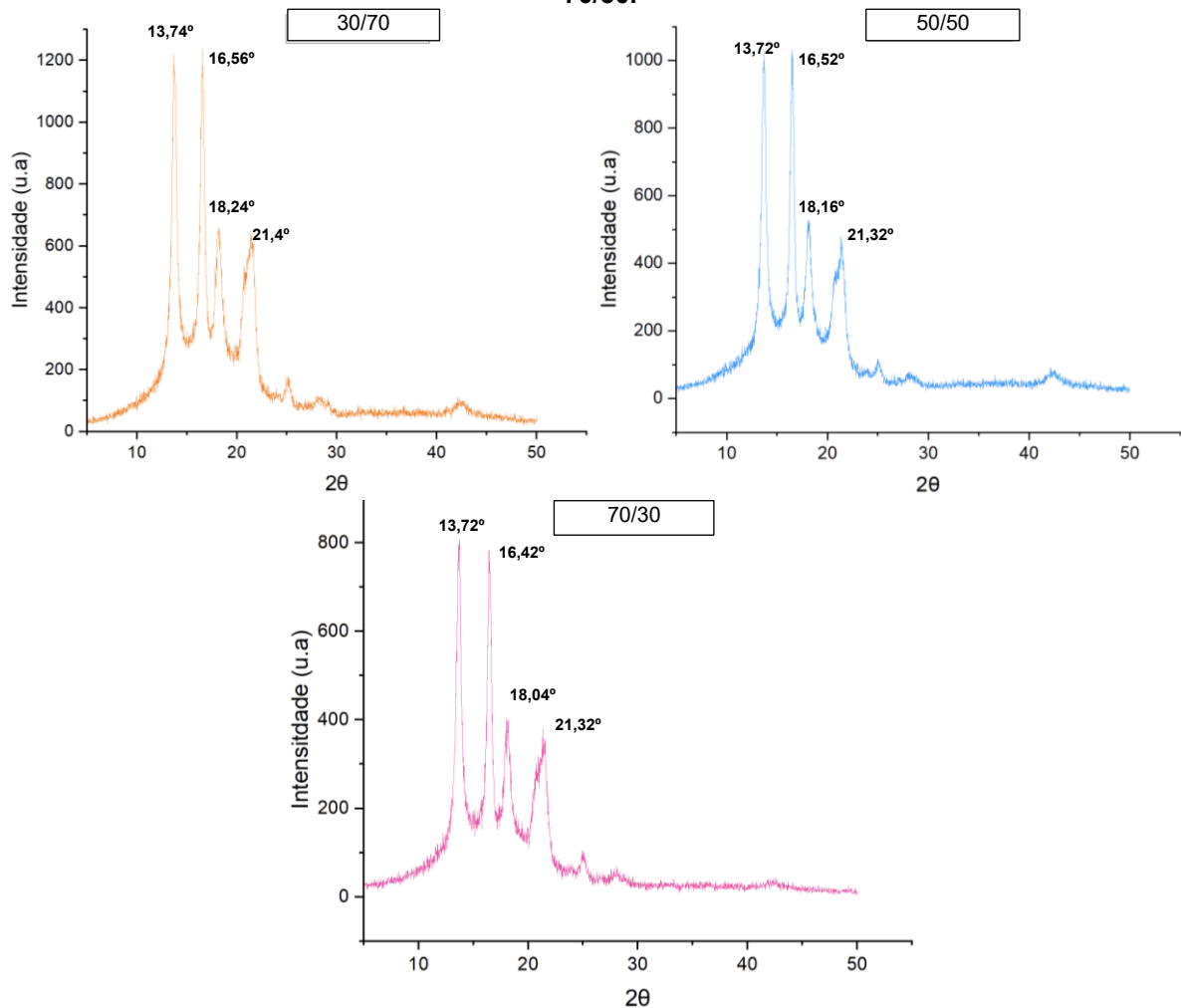
Fonte: Aatoria Própria (2023).

Ao observar os valores apresentados acima, nota-se primeiramente que o valor de entalpia de fusão (ΔH_f) aumenta gradativamente conforme aumenta a proporção de PPv. O filamento com proporção 30/70 apresentou ΔH_f com valor próximo ao PPr, apontando que a presença de PPv na mistura não alterou significativamente o comportamento térmico do filamento, já os filamentos com proporção 50/50 e 70/30, respectivamente apresentaram ΔH_f maior que o PPv, indicando que a presença representativa do PPv na mistura dos filamentos influenciou no comportamento térmico dos mesmos.

4.3.2 Difração de Raio-X (DRX) dos filamentos

Na Figura 26 observa-se os difratogramas da análise DRX nos filamentos com proporção 30/70, 50/50 e 70/30, respectivamente.

Figura 26 – Difratogramas das análises de Difração de Raio-X para os filamentos 30/70, 50/50 e 70/30.



Fonte: Autoria Própria (2023).

As amostras 30/70, 50/50 e 70/30 apresentaram picos nos seguintes graus em 2θ apresentados na Tabela 9 abaixo:

Tabela 9 – Resultados das análises de Difração de Raio-X para os filamentos 30/70, 50/50 e 70/30.

PPv 2θ	PPr 2θ	30/70 2θ	50/50 2θ	70/30 2θ
$13,72^\circ$	$13,64^\circ$	$13,74^\circ$	$13,72^\circ$	$13,72^\circ$
$16,46^\circ$	$16,50^\circ$	$16,56^\circ$	$16,52^\circ$	$16,42^\circ$
$18,14^\circ$	$18,10^\circ$	$18,24^\circ$	$18,16^\circ$	$18,04^\circ$
$21,40^\circ$	$21,48^\circ$	$21,4^\circ$	$21,32^\circ$	$21,32^\circ$

Fonte: Autoria Própria (2023).

Assim como nos resultados dos polímeros PPv e PPr, não há mudança significativa nos graus em 2θ dos picos encontrados, sugerindo que a incorporação de PPv e PPr mantem os picos de cristalinidade características do polipropileno, como anteriormente citados na seção 4.1.2.

4.3.3 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) dos Filamentos

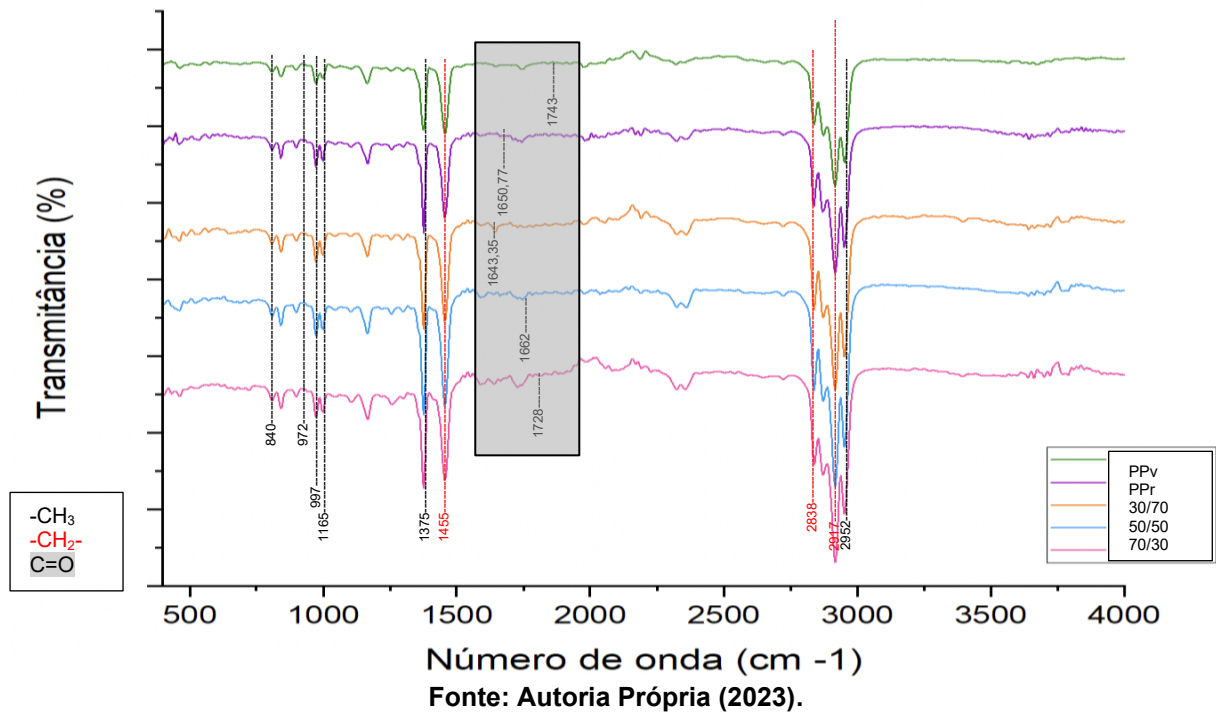
Para melhor interpretação da análise FTIR, vale destacar que o polipropileno é constituído por ligações químicas característica do grupos das poliolefinas, isto é, tem como monômero uma olefina simples, ou alceno (C_nH_{2n}), formado por monômeros de propeno que tem a fórmula química C_3H_6 (Carey, 2011).

Na Figura 27, estão apresentadas as espectroscopias da análise FTIR com picos sobrepostos dos cinco filamentos extrusados PPv – 100% polipropileno virgem, PPr – 100% polipropileno reciclado e com diferentes proporções 30/70, 50/50 e 70/30.

Nos difratogramas obtidos das cinco amostras, é possível identificar as seguintes bandas em 840, 972, 997, 1.165, 1.375, 2.952 cm^{-1} referentes ao grupo metil $-CH_3$, as bandas em 1.455, 2.838, 2.917 cm^{-1} são relativas ao grupo $-CH_2-$, além desses a amostra PPv apresentou pico em 1.743 cm^{-1} , PPr em 1.650,77 cm^{-1} , o filamento 30/70 em 1.643,35 cm^{-1} , o 50/50 em 1.662 cm^{-1} e o 70/30 em 1.728 cm^{-1} , que são bandas referentes ao grupo carbonila $C=O$.

No estudo de Gopanna *et al.*, 2019 sobre as propriedades por meio de FTIR, de polipropileno para análise qualitativa e quantitativa, apresentaram os picos de absorção do grupo metil $-CH_3$ que são possíveis de serem observados primeiramente no pico 840 cm^{-1} que se refere a ligação $-CH_3$ em vibração de estiramento, os picos de 972, 997 e 1165 cm^{-1} são atribuídos a ligação $-CH_3$ de vibração de dobramento, uma vibração de flexão simétrica do grupo $-CH_3$ é identificada em 1.375 cm^{-1} e um pico de absorção relacionado a vibração de estiramento assimétrica do grupo $-CH_3$ é observada em 2.952 cm^{-1} . Os picos em 1.455, 2.838 e 2.917 cm^{-1} são atribuídos ao grupo $-CH_2-$ com vibração simétrica de flexão, simétrica de estiramento e assimétrica de estiramento, respectivamente.

Figura 27 – Espectros de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier sobrepostos dos filamentos PPv, PPr, 30/70, 50/50 e 70/30.



Em relação a presença do grupo carbonila (C=O), este grupo é considerado um resultado da oxidação do material polimérico, formado como resíduo quando o material é exposto a deformações térmicas e mecânicas com a presença de oxigênio, a região no espectro deste grupo está na faixa de comprimento de onda de 1600 – 1900 cm^{-1} (Wee *et al.*, 2018). Este fato se enquadra com os resultados encontrados nos difratogramas das análises visto que as amostras sofreram deformações termomecânicas, de modo que apresentam bandas na região respectiva do grupo carbonila.

De acordo com Chammingkwan *et al.* (2017) ao abordar a influência da isotaticidade e sua distribuição no comportamento de degradação do polipropileno, destaca que embora apresentem alta estabilidade química, as poliolefinas sofrem oxidação durante o processo de *pelletização* o que pode iniciar um processo de degradação a partir de ligações fracas como carbonos terciários e contaminantes que aceleraram o processo de degradação, diminuindo a estabilidade da cadeia polimérica.

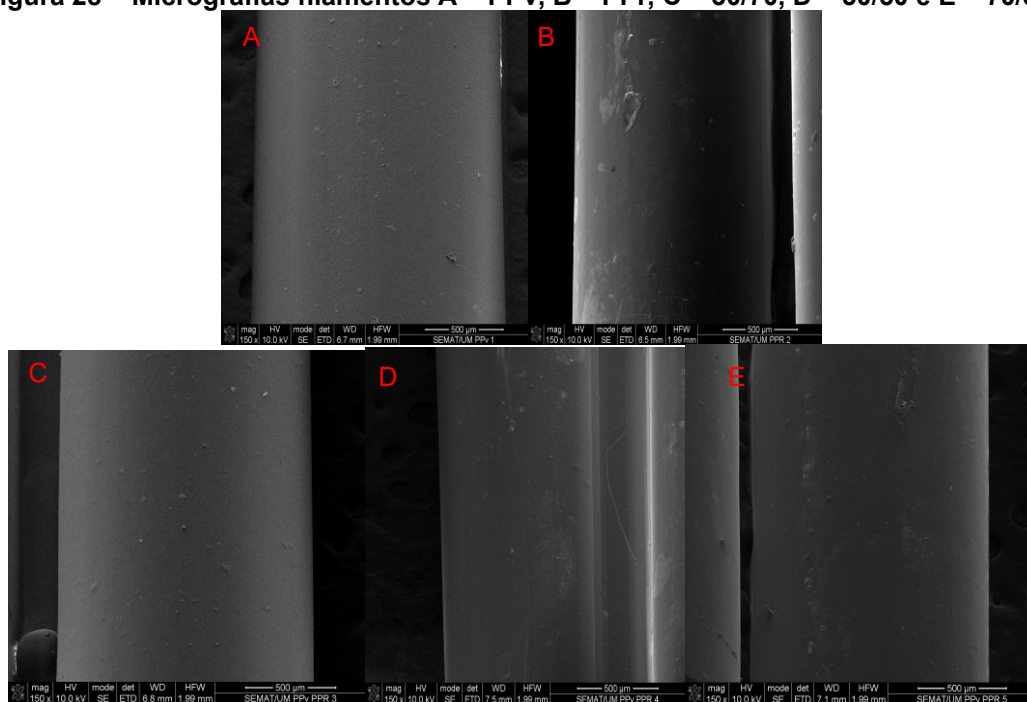
A partir destes estudos é possível observar que as amostras possuem bandas característicos dos grupos químicos do polipropileno, indica autenticidade sobre a composição das mesmas, e a presença do grupo carbonila aponta a degradação

térmicas e mecânicas recorrentes das deformações por temperatura e processamento da *pelletização* e extrusão. Além disso, todas as amostras submetidas a análise FTIR apresentaram resultados próximos, indicando que não há alteração quanto a composição do polipropileno reciclado e dos filamentos com misturas de polipropileno virgem e reciclado.

4.3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As Figura 28 apresentam as micrografias obtidas por análise MEV dos filamentos PPv (A), PPr (B), 30/70 (C), 50/50 (D) e 70/30 (E). É possível visualizar que todos os filamentos possuem semelhanças estruturais, aspecto liso e poucos defeitos aparentes, assim como Armagan *et al.* (2014) que ao analisarem filamentos de polipropileno identificaram uma superfície lisa e nivelada.

Figura 28 – Micrografias filamentos A – PPv, B – PPr, C – 30/70, D – 50/50 e E – 70/30.

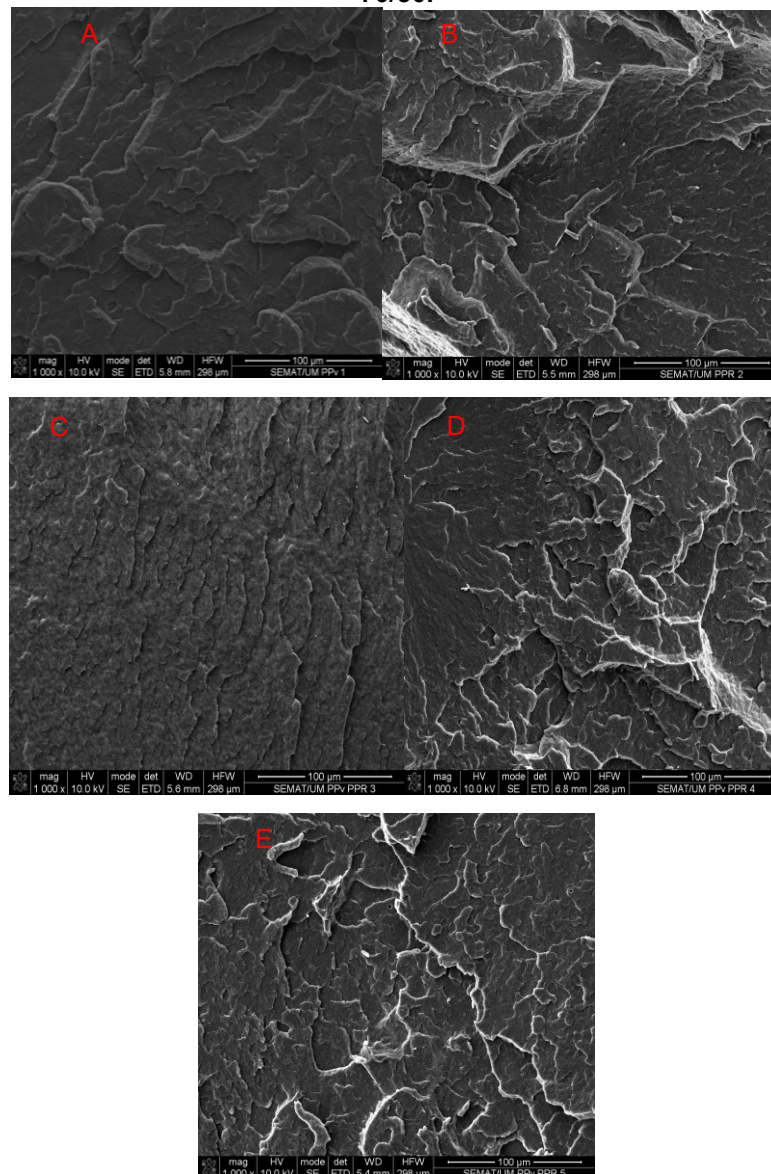


Fonte: Autoria Própria (2023).

Nas Figura 29 visualiza-se as micrografias após fratura dos filamentos PPv (A), PPr (B), 30/70 (C), 50/50 (D) e 70/30 (E). Ao observar essas imagens obtidas pelo MEV nas amostras fraturadas, pode-se visualizar um carácter homogêneo dos polímeros, como também o comportamento da deformação elástica característica do polipropileno.

Ao analisar a Figura 29 A e B obtidas para o PPv e PPr, respectivamente, observa-se diferenças entre superfícies, o PPv apresenta maior uniformidade em relação as marcas da fraturas, entretanto para o PPr apresenta uma superfície muito rugosa e irregular. Além de que para o filamento com proporção 30/70, observa-se um padrão muito regular e uniforme, apresentando maior homogeneidade, fato este que não ocorre nas amostras com proporções 50/50 e 70/30 onde o padrão do PPr se repete de uma maneira ainda mais desordenada.

Figura 29 – Micrografia fraturas filamentos A – PPv, B – PPr, C – 30/70, D – 50/50 e E – 70/30.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Chinaglia e Correa (1997) apontam que no caso do polipropileno virgem, as micrografias não possuem contraste suficiente para se observar a dispersão de carga

na amostra, ou seja, possui mais uniformidade definindo que o material sofreu fratura tipicamente frágil. Entretanto, para micrografias de polipropileno reciclado, revela-se uma distribuição heterogênea de cargas, define que esta amostra sofreu fratura dúctil.

Com isso, pode-se apontar que a amostra 100% PPv e com proporção 30/70 sofreram fraturas do tipo frágil, e as amostras 100% PPr e com proporção 50/50 e 70/30 tem fraturas do tipo dúctil, sendo que classificação dos diferentes tipos de ruptura é baseada de acordo com a capacidade de deformação plástica do material (Callister, 1997).

Em virtude dos fatos mencionados, os estudos de diferentes proporções da composição do PPv/PPr podem ser considerados como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de artigos têxteis com menor impacto ambiental, que contribuirá para a sustentabilidade das indústrias têxteis que utilizam em grande escala o material polipropileno, além dos benefícios financeiros que podem ser obtidos a partir do uso de materiais reciclados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação a mudança de cristalinidade e composição química das amostras com diferentes proporções de incorporação de polipropileno virgem e reciclado, apontam que não houve mudanças significativas nos valores obtidos, indicando que os processos sofridos por estes materiais não alteraram significativamente essas propriedades, preservando as particularidades do polipropileno virgem e viabilizando o uso do polipropileno reciclado.

No que se refere as características térmicas, o filamento com proporção 30/70, teve resultados mais próximos ao polipropileno virgem em relação as temperaturas de degradação, temperatura de fusão e entalpia de fusão, fatores importantes que permitem com que a produção industrial de filamentos com esta proporção aconteça dentro dos mesmos parâmetros do polímero virgem, principalmente pela extrusão de filamentos utilizar faixas de temperaturas específicas para cada material.

Acerca dos aspectos físicos das fraturas, o filamento com proporção 30/70 foi o que mais se assemelhou com o filamento PPv, pois ambos obtiveram fraturas frágeis, o que viabiliza o uso do polipropileno reciclado juntamente ao virgem para aplicações têxteis.

Portanto a caracterização dos filamentos com diferentes proporções de polipropileno virgem e reciclado, possibilitou apontar que o uso do material reciclado atinge os parâmetros e exigências do material puro, e que o estudo da proporção da composição dos materiais é um fator importante para definir a correta utilização do PPr. Estas considerações permitem afirmar que a investigação da incorporação do PPr em PPv contribuiu positivamente para a diminuição do impacto ambiental causado pela extração e produção de polipropileno virgem, em específico na indústria têxtil, que utiliza estes polímeros em diversas aplicações.

REFERÊNCIAS

- ADANUR, S. **Gestão de resíduos têxteis**. *Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles*, Technomic Publishers. Lancaster, PA, EUA, p. 713, 1995.
- ALEXANDER, L. E. **X-Ray Diffraction on Methods in Polymer Science**. John Wiley & Sons, EUA, 1969.
- ALMEIDA, G. S. G.; SOUZA, W. B. **Processamento de polímeros por extrusão e injeção**. São Paulo, Brasil: Saraiva, 2015.
- ARMAGAN, Osman Gazi, *et al.* **Adhesin strength behaviour of plasma pretreated and laminated polypropylene nonwoven fabrics using acrylic and polyurethane-base adhesives**. *Journal of Industrial Textiles*, vol. 43, p. 396-414, 2014.
- ASMATULU, R.; KHAN, W. S. **Introduction to electrospun nanofibers: Synthesis and Applications of Electrospun Nanofibers**. Amsterdã, Holanda: Elsevier, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. ABIPLAST. **Estudo aponta que 23,1% dos resíduos plásticos de consumo foram reciclados em 2020 no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/estudo-aponta-que-231-dos-residuos-plasticos-pos-consumo-foram-reciclados-em-2020-no-brasil/>. Acesso em: 8 jun. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO ABIT. **Brasil: Consumo industrial de fibras e filamentos - 1970 a 2019**. 2019. Disponível em: <https://www.abit.org.br/uploads/arquivos/Consumo%20Industrial%20de%20Fibras%20e%20Filamentos%20-%201970%20a%202019.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO ABIT. **Cartilha Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira - Cenários, Desafios, Perspectivas e Demandas**. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO ABIT. **Perfil do setor**. 2023. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 11 jun. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.230: Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis – Identificação e simbologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- BAJAJ, P.; SHARMA, N. D. Reuse of polymer and fibre waste em GUPTA, V. B.; KOTHARI, V. K. **Manufactured Fibre Technology**. 1. ed. Londres: Chapman & Hall, 1997, cap. 20.
- BARBIERI, L. *et al.* **Management of agricultural biomass wastes: Preliminary study on characterization and valorization in clay matrix bricks**. *Waste Management* v. 33, p. 2307-2315, 2013.

BARBOSA, Luiz Gustavo; PIAIA, Matheus; CENI, Gustavo Henrique. **Analysis of Impact and Tensile Properties of Recycled Polypropylene**. International Journal of Materials Engineering, v. 7, n. 6, p. 117-120, 2017.

BHADRA, Sambhu; KHASTGIR, Dipak. **Determination of crystal structured of polyaniline and substituted polyanilines through powder x-ray diffraction analysis**. Polymer Testing, v. 27, p. 851–857, 2008.

BRASIL. Ministério da Educação. **Manual de Educação para o Consumo Sustentável**. Brasília: MEC, 2005. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/dmdocuments/publicacao8.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2023

BRITO JÚNIOR, C. A. R.; *et al.* **Poliacrilonitrila: Processos de Fiação Empregados na Indústria**. Polímeros, v. 22, n. 6, p. 764–770, 2013.

BROGNOLI, R. **Desenvolvimento da qualidade na reciclagem de plásticos**. Esteio: SENAI-RS, 2006.

BORA, R. R.; WANG, R.; YOU, F. Waste Polypropylene Plastic Recycling toward Climate Change Mitigation and Circular Economy: Energy, Environmental, and Technoeconomic Perspectives. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 8, n. 43, p. 16350– 16363, 2020.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 4^a ed. John Wiley & Sons, EUA, 1997.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 9^a ed. Hoboken, EUA, 2014.

CAREY, F. A. **Química orgânica. V.1**. Brasil: Grupo A, 2011. *E-book*. ISBN 9788580550535.

CHAMMINGGWAN, Patchanee.; YAMAGUCHI, Fumitaka; TERANO, Minoru; TANIKE, Toshiaki. **Influência da isotacticidade e sua distribuição no comportamento de degradação do polipropileno**. Polymer Degradation and Stability, v. 143, p. 253–258, 2017.

CHINAGLIA, C. R.; CORREA, C. A. **Análise de Falhas em Materiais Através de Técnicas Avançadas de Microscopia**. Polímeros: Ciências e Tecnologia, 1997.

COSTA, Ana Cristina Rodrigues da; ROCHA, Érico Rial Pinto da. **Panorama da cadeia produtiva têxtil e de confecções e a questão da inovação**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 29, p. 162-163, 2009.

DEDAVID, B. A. *et al.* **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras**. EDIPUCRS, Porto Alegre, 2007.

ELMAJDOUBI, M.; VU-KHAN, T. **Effect of cooling rate on fracture behaviour of polypropylene**. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, v. 39, p. 117-126, 2003.

FOURNÉ, F. **Synthetic Fibers: Machines and Equipment, Manufacture e Properties**. Munique, Alemanha: Hanser, 1999.

GORNI, Antonio Augusto. **Introdução aos Plásticos**. Revista Plástico Industrial, v. 10, n.9, p. 1-17, 2003.

GOPANNA, A. *et al.* **Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia Raman e espalhamento de raios X de grande ângulo (WAXS) de misturas de polipropileno (PP)/copolímero de olefina cíclica (COC) para análise qualitativa e quantitativa**. Polimer Bulletin, v. 76, p. 4259-4274, 2019.

HOPEWELL, Jefferson; DVORAK, Robert; KOSIOR, Edward. **Plastics recycling: challenges and opportunities**. Philosophical Transactions of the Royal Society by Biological Sciences, v. 364, n. 1526, p. 2115-2126, 2009.

HUFENUS, Rodolfo *et al.* **Melt-spun fibers for textile applications**. Materials, v. 13, n. 19, p. 4298, 2020.

HUSIN, M. *et al.* **Fourier Transforms Infrared Spectroscopy and X-Ray Diffraction Investigation of Recycled Polypropylene/Polyaniline Blends**. Chemical Engineering Transactions, v. 56, p. 1015 -1020, 2017.

IONASHIRO, M. G. **Fundamentos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial**. São Paulo: Giz Editorial, 2004.

JAMBRICH, M.; HODUL, P. Textile applications of polypropylene fibers. *In*: KARGER-KOCSIS, J. **Polypropylene: An A-Z reference**. 1. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999, p. 806-812.

KARGER-KOCSIS, J. Structure and morphology, in polypropylene: structure, blends and composites, v. 1. London: Chapman & Hall; 1995.

KASWELL, E. R. **Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles**. New York: Wellington Sears Company, 1963.

LA MANTIA, F. P. Basic concepts on the recycling of homogeneous and heterogeneous plastics. *In*: LA MANTIA, F.P. **Recycling of PVC and Mixed Plastics**. Toronto: ChemTec, 1996. p. 63-76.

LA MANTIA, F. P. Recycling of polypropylene. *In*: KARGER-KOCSIS, J. **Polypropylene: An A-Z reference**. 1. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999, p. 701-705.

LOBO, R. N.; LIMEIRA, E. T. N. P.; MARQUES, R. N. **Fundamentos da Tecnologia Têxtil: da concepção da fibra ao processamento de estamparia**. São Paulo: Érika, 2014.

LYU, L.; *et al.* **Towards environmentally sustainable management: a review on the generation, degradation and recycling of polypropylene face mask waste**. Journal of Hazardous Materials, v. 461, 2023.

MADI, N. K. **Thermal and mechanical properties of injection molded recycled high density polyethylene blends with virgin isotactic polypropylene**. *Materials & Design*, v. 46, p. 435-441, 2013.

MAIER, C.; CALAFUT, T. **Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook**. Elsevier, 1998

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1999.

MAO Q.; *et al.* **Melt spinning of high-strength fiber from low-molecular-weight polypropylene**. *Polymer Engineering & Science*, v. 56, n. 2, p. 233–239, 2016.

MICHAELI, W. **Tecnologia dos Plásticos**, 1ed. São Paulo: Ed. E. Blucher, 2005.

MICHEL, R. M.; MÜLLER, A. J. **Cristalização Confinada de Materiais Poliméricos**. Elsevier, v. 54-55, p. 183-213, 2016.

MISHRA, S. P. – “A Text Book of Fibre Science and Technology”, New Age International Publishers, New Delhi, 2005.

MORAIS, D. S. *et al.* **Caracterização de estruturas têxteis trançadas multifilamentares de polipropileno (PP) e poli(tereftalato de etileno) (PET) para substituição parcial do tendão de Aquiles**. *Mecânica dos Materiais*, v. 153, 2021.

MUSTAFA, N. **Plastics Waste Management: Disposal Recycling and Reuse**. EUA: Marcel Decker Inc, 1993.

NADKARNI, V. M. Computer simulation of melt spinning. *In*: GUPTA, V. B.; KOTHARI, V. K. **Manufactured Fibre Technology**. 1. ed. Londres: Chapman & Hall, 1997, cap. 5.

NASIR, A.; YASIN, T.; ISLAM, A. **Thermo-oxidative degradation behavior of recycled polypropylene**. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 119, ed. 6, p. 3315–3320, 2010.

PICPLAST. **Estudo aponta que 23,1% dos resíduos plásticos pós-consumo foram reciclados em 2020 no Brasil**. 23 nov. 2021. Disponível em: <<https://www.picplast.com.br/detalhe-noticia/estudo-aponta-que-231-dos-residuos-plasticos-pos-consumo-foram-reciclados-em-2020-no-brasil>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

PLASTIVIDA – INSTITUTO SÓCIO-AMBIENTAL DOS PLÁSTICOS. **Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos no Brasil**. São Paulo: Plastivida, 2012.

RAMOS, V. D.; COSTA, H. M. **Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: thermal analysis**. *Polymer Test*, vol. 26: p. 676–84, 2007.

RODRIGUES, M. T. **Estudo de propriedades de propileno puro e reciclado**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2020.

ROE, R. **X-ray diffraction: Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. EUA: Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, v. 17, 1985.

ROSÁRIO, F.; *et al.* **Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado**. *Polímeros*, v. 21, n. 2, p. 90-97, 2011.

SATO, N.; TAKARASHI, H.; KURAUCHI, T. Bumper Recycling Technology. *In: KARGER-KOCSIS, J. Polypropylene: An A-Z reference*. 1. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 68-75, 1999.

SAKAI, T. **Screw extrusion technology - Past, present and future**. *Polymers*, v. 58, p. 847–857, 2013.

SCHÄFER, K. Melt spinning: technology. *In: KARGER-KOCSIS, J. Polypropylene: An A-Z reference*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. p. 440-445, 1999.

SEN, A. K. **Coated Textiles: Principles and Applications**. EUA: CRC Press, 2008.

SEN, K. Polypropylene Fibres. *In: GUPTA, V. B.; KOTHARI, V. K. Manufactured Fibre Technology*. 1. ed. Londres: Chapman & Hall, 1997, cap. 16.

SILVERSTEIN, R. M. **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos**. Brasil: Grupo GEN, 2019. *E-book*. ISBN 9788521636472

SPADETTI, C; *et al.* **Propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos de Polipropileno pós-consumo reforçados com fibras de celulose**. *Polímeros*, v. 27, p. 84-90, 2017.

SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Química nova*, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

SPRUIELL, J. E.; BOND, E. Melt spinning of polypropylene. *In: KARGER-KOCSIS, J. Polypropylene: An A-Z reference*. 1. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 427-439, 1999.

STOIAN, S. A. *et al.* **Polipropileno reciclado com melhor estabilidade térmica e processabilidade por fusão**. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 138. p. 2469-2480, 2019.

VAN DOOREN, A. A.; MÜLLER, B. W. **Purity determinations of drugs with differential scanning calorimetry (DSC) – a critical review**. *International Journal of Pharmaceutics*, v. 20, n. 3, p. 217–233, 1984.

VASSILIOU, A. *et al.* **Nanocomposites of isotactic polypropylene with carbon nanoparticles exhibiting enhanced stiffness, thermal stability and gas barrier properties**. *Composites Science and Technology*, vol. 68, p. 933–943, 2008.

WANG, J.; *et al.* **Experimental research on compressive properties of recycling polypropylene (PP) fiber recycled coarse aggregate concrete**, Journal of Building Engineering, v. 76, 2023.

WATT, E.; *et al.* **Hybrid biocomposites from polypropylene, sustainable biocarbon and graphene nanoplatelets**. Scientific Reports, v. 10, n. 1, p. 10714, 2020.

WEE, J. W., *et al.* **Effect of weathering-induced degradation on the fracture and fatigue characteristics of injection-molded polypropylene/talc composites**. International Journal of Fatigue. v.117, p. 111-120, 2018.

WRIGHT, S. L.; KELLY F. **Plastic and human health: A micro issue?**. ACS Publications, v. 51, n. 12, p. 6634-6647, 2017.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE. WWF. **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico.** 4 mar. 2019. Disponível em:<<https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>>. Acesso em: 12 abr. 2023.