



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias

Fábio Rezende de Souza

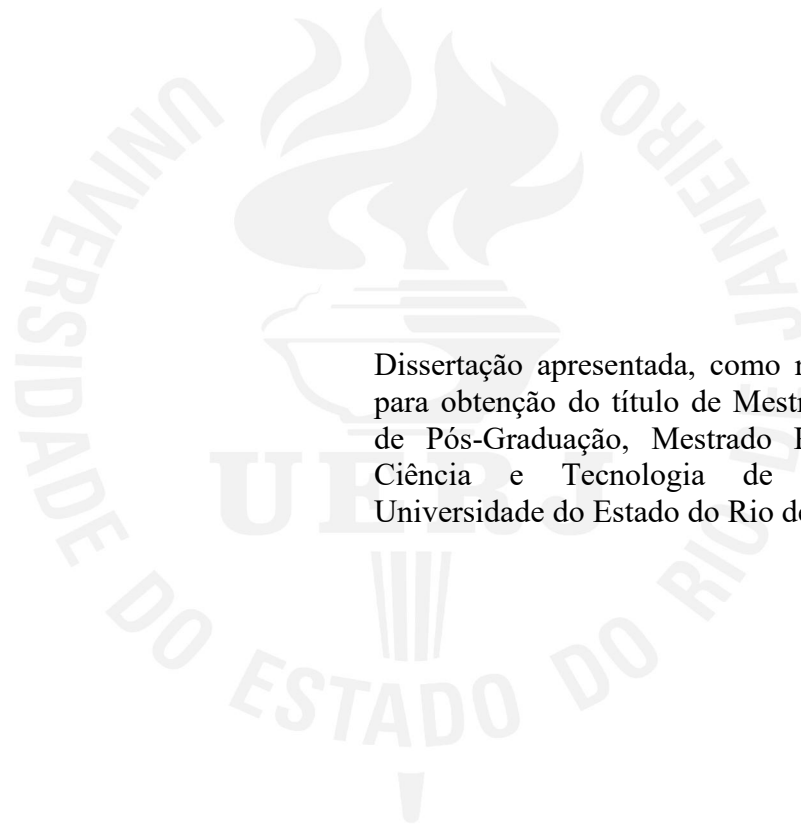
**Compósitos obtidos a partir de polipropileno e muscovita ultrassonicada**

Rio de Janeiro

2023

Fábio Rezende de Souza

Compósitos obtidos a partir de polipropileno e muscovita ultrassonicada



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Shirleny Fontes Santos

Coorientadora: Dra. Silvia Cristina Alves França

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CZO

S729 Souza, Fábio Rezende de

Compósitos obtidos a partir de polipropileno e muscovita ultrassonicada / Fábio Rezende de Souza - 2023.

66 f.

Orientadora: Shyrlene Fontes Santos  
Coorientadora: Silvia Cristina Alves França

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais.

1. Ciência e Tecnologia de Materiais - Teses. 2. Muscovita - Teses. 3. Polipropileno (PP) - Teses. 4. Compósitos – Teses. 5. Ultrassonificação – Teses. I. Santos, Shyrlene Fontes Santos. II. França, Silvia Cristina Alves. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias. IV. Título.

CDU 620

Bibliotecária: Joice Soltosky Cunha – CRB 7 5946

Autorizo apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que cite a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Fábio Rezende de Souza

**Compósitos obtidos a partir de polipropileno e muscovita ultrassonicada**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação, Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 07 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Shirleny Fontes Santos (Orientadora)  
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias-UERJ

---

Dra. Silvia Cristina Alves França (Coorientadora)  
Centro de Tecnologia Mineral

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Karollyne Gomes Castro Monsores  
Universidade Augusto Motta

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Elaine Vidal Dias Gomes Libano  
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias - UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Luanda Silva de Moraes  
Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias - UERJ

Rio de Janeiro

2023

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

Às minhas fontes inspiradoras, Glicéia Gonçalvez Rezende, minha mãe e Juliana Rezende de Souza, minha irmã e eterna professora de matemática.

Ao meu sobrinho Lucas Teixeira Takenawa de Souza.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter estado presente durante toda minha vida, me fortalecendo e dando sabedoria para enfrentar as dificuldades do cotidiano.

À minha amada família, que sempre me apoiou e incentivou meus estudos, em especial à minha mãe Glicéia Gonçalves Rezende pelas broncas construtivas, à minha irmã Juliana Rezende de Souza, que serviu como ponte, para que eu me descobrisse no campo das ciências exatas e ao meu sobrinho Lucas Teixeira Takenawa de Souza, por ser fonte de inspiração.

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro e a todo o corpo docente, secretaria, coordenação e administração por terem contribuído para que eu pudesse celebrar este momento.

À minha coorientadora Prof.<sup>a</sup> Dra. Silvia Cristina Alves França, por facilitar a acessibilidade ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e possibilitar análises importantes para a discussão dos resultados deste trabalho.

À Prof.<sup>a</sup> Dra. Elaine Vidal Dias Gomes Libano, por colaborar diretamente na produção do conteúdo por nós publicado.

Deixo um agradecimento especial à minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dra. Shirleny Fontes Santos, por ter confiado em mim e por ter dedicado seu escasso tempo ao meu projeto de pesquisa.

E a todos que contribuíram significativamente para realização do meu sonho de obter o título de Mestre.

Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!

*Mário Sergio Cortella*

## RESUMO

SOUZA, Fábio Rezende de. *Compósitos obtidos a partir de polipropileno e muscovita ultrassonicada*. 2023. 66 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Compósitos de matriz polimérica com minerais filossilicatos são sistemas conhecidos e com boa parte das propriedades e potencialidades de aplicações bem documentadas na literatura. Entretanto, esses sistemas usualmente necessitam de aditivos e/ou tratamentos químicos do mineral para melhorar a adesão matriz/carga. Particularmente para a mica muscovita existem entre suas lamelas cátions e hidroxilas, de modo que sua delaminação poderia contribuir para melhorar a interação em sistemas polímero/mineral. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo estudar a influência do tratamento ultrassônico da muscovita na obtenção de compósitos com polipropileno (PP). A muscovita (-125 $\mu$ m) foi tratada ultrassonicamente por 60 e 120 minutos e utilizada na obtenção de compósitos com o polímero (PP, PP/Mica125, PP/Mica125US60 e PP/Mica125US120), com o teor do mineral a 15%. As amostras foram processadas em extrusora mono-roscas, seguido de moagem e conformação em filmes planos. A distribuição de tamanho de partícula e o MEV obtidos para as micas ultrassonicadas revelaram aumento da delaminação e diminuição do tamanho de partícula com aumento do tempo de tratamento. A caracterização dos compósitos quanto a densidade exibiu aumento da propriedade com aumento do tempo de tratamento ultrassônico, o que sugere melhoria da interação com o polímero. O MEV dos compósitos revelou uma distribuição mais homogênea e maior alinhamento do mineral para as amostras tratadas ultrassonicamente. Os resultados de impacto IZOD sugeriram o aumento da cristalinidade para a amostra PP/Mica125US120. O FTIR indicou que a natureza da interação polímero/mineral não foi alterada pelo tratamento ultrassônico. Porém o DRX revelou deslocamento da posição de alguns picos da mica nos compósitos, independentemente da ultrassonicação, o que pode indicar intercalação do mineral pelas cadeias poliméricas. A análise geral dos resultados evidencia que o tratamento ultrassônico é eficaz para delaminar a muscovita e melhorar a interação com o polímero, tendo sido observado melhores resultados para a amostra PP/Mica125US120.

Palavras-chave: Muscovita. Polipropileno (PP). Compósitos. Ultrassonicação.



## ABSTRACT

SOUZA, Fábio Rezende de. *Composites based on Polypropylene and ultrasonic treated muscovite*. 2023. 66 f. Dissertation (Professional Master's Degree in Materials Science and Technology) – Faculty of Exact Sciences and Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Composites based on polymers and phyllosilicate minerals are well-known systems with many of their properties and application potential well documented in the literature. However, these systems usually require additives and/or chemical treatments of the mineral to improve matrix/filler adhesion. Particularly for muscovite mica, there are cations and hydroxyls between its lamellas, so that their delamination could contribute to improving the interaction in polymer/mineral systems. In this context, this work aimed to study the influence of ultrasonic treatment of muscovite on obtaining composites with polypropylene (PP). Muscovite (-125 $\mu$ m) was treated ultrasonically for 60 and 120 minutes and used to obtain composites with the polymer (PP, PP/Mica125, PP/Mica125US60 and PP/Mica125US120), with a mineral content of 15%. The samples were processed in a single-screw extruder, followed by grinding and conforming into films. The particle size distribution and SEM obtained for the ultrasonicated micas revealed an increase in delamination and a decrease in particle size with increasing treatment time. The characterization of the composites in terms of density showed an increase in that property with an increase in ultrasonic treatment time, which suggests an improvement in the interaction with the polymer. The SEM of the composites revealed a more homogeneous distribution and greater alignment of the mineral for the ultrasonically treated samples. The IZOD impact results suggested increased crystallinity for the PP/Mica125US120 sample. FTIR indicated that the nature of the polymer/mineral interaction was not altered by ultrasonic treatment. However, XRD revealed a shift in the position of some mica peaks in the composites, regardless of ultrasonication, which may indicate intercalation of the mineral by the polymer chains. The general analysis of the results shows that the ultrasonic treatment is effective in delaminating the muscovite and improving the interaction with the polymer, with better results being observed for the PP/Mica125US120 sample.

Keywords: Muscovite. Polypropylene (PP). Composites. Ultrasound.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Etapas de polimerização do PP.....	16
Figura 2 –	Exemplos de aplicações com polímeros sintéticos.....	17
Figura 3 –	Exemplos de aplicações de polímeros de engenharia.....	18
Figura 4 –	Exemplos de aplicações de plástico, borracha e fibra.....	19
Figura 5 –	Formas comuns de organização das cadeias dos polímeros.....	20
Figura 6 –	Esquema simplificado da reação polimerização do polipropileno a partir do monômero propileno.....	21
Figura 7 –	Exemplos de aplicações do polipropileno.....	22
Figura 8 –	Mica do tipo muscovita do nordeste do Brasil.....	24
Figura 9 –	Estrutura da mica muscovita projetada no plano (010).....	24
Figura 10 –	Muscovita da província pegmatítica da Borborema (RN) no Brasil.....	25
Figura 11 –	Muscovita folha (esquerda) e moída (direita).....	27
Figura 12 –	Exemplo de rota de beneficiamento da mica muscovita.....	28
Figura 13 –	Esquema da formação, crescimento e colapso de bolhas na cavitação...	29
Figura 14 –	Esquema geral da relação carga/matriz num compósito.....	30
Figura 15 –	Administração de resíduos plásticos.....	36
Figura 16 –	Fluxograma das etapas deste trabalho.....	39
Figura 17 –	(a) Peneirador BERTEL e (b) Mica moída na granulometria de -125 $\mu\text{m}$ .....	41
Figura 18 –	(a) Exquema experimental utilizado no tratamento ultrassônico, (b) Suspensão de muscovita sendo ultrassonicada.....	42
Figura 19 –	Fotos das amostras obtidas após extrusão e prensagem.....	43
Figura 20 –	Distribuição de tamanho de partícula das amostras de muscovita antes e após ultrassonicação.....	46
Figura 21 –	Imagens de MEV das amostras: (a) Mica125, (b) Espessura da Mica125, (c) Mica125US60, (d) Espessura da Mica125US60, (e) Mica125US120 e (f) Espessura da Mica125US120.....	48
Figura 22 –	FTIR das amostras de muscovita antes e após tratamento ultrassônico.....	49
	Difratogramas de raios-X das amostras de muscovita antes e após	

Figura 23 – tratamento ultrassônico.....	50
Figura 24 – MEV das amostras: (a) PP, (b) PP/Mica125, (c) PP/Mica125US60 e (d) PP/Mica125US60.....	53
Figura 25 – FTIR do PP puro e dos compósitos PP/Mica125.....	54
Figura 26 – Difratoformas de raios X do PP puro e dos compósitos PP/Mica125.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1–	Propriedades físicas da muscovita.....	26
Tabela 2–	Proporções de cada componente dos compósitos produzidos.....	43
Tabela 3–	Tamanho de partícula da muscovita antes e após tratamento	
Tabela 4–	ultrassônico.....	47
	Resultados das análises de densidade, dureza, MFI e impacto dos	
	compósitos.....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing Materials ou Associação Normatizadora Norte Americana</i>
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DP	Grau de polimerização
DRX	Difração de raiosX
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MFI	Medida do índice de fluidez
MO	Microscopia Óptica
PC	Pós-consumo
PET	Poli (etileno tereftalato)
PI	Pós-industriais
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
SISPLAST	Sistemas em plásticos
TGA	Análise Termogravimétrica
US	Ultrassônica
Xc	Grau de cristalinidade

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	15
1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	15
1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	15
2	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	16
2.1	<b>Polímeros</b> .....	16
2.1.1	<u>Classificação de polímeros</u> .....	18
2.1.2	<u>Polipropileno</u> .....	21
2.2	<b>Mica muscovita</b> .....	23
2.2.1	<u>Ultrassonicação de Minerais</u> .....	28
2.3	<b>Compósitos</b> .....	30
2.3.1	<u>Compósitos com matriz</u> <u>polimérica</u> .....	31 34
2.4	<b>Sustentabilidade</b> .....	39
3	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	40
3.1	<b>Equipamentos</b> .....	41
3.2	<b>Materiais</b> .....	41
3.2.1	<u>Polipropileno</u> .....	41
3.2.2	<u>Mica muscovita</u> .....	42
3.3	<b>Tratamento ultrassônico da</b> <b>muscovita</b> .....	42
3.4	<b>Preparo dos compósitos</b> .....	44
3.5	<b>Caracterização dos materiais</b> .....	44
3.5.1	<u>Análise de tamanho de partícula</u> .....	44
3.5.2	<u>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</u> .....	44
3.5.3	<u>Espectroscopia de infravermelhos com transformada de Fourier (FTIR)</u> .....	44
3.5.4	<u>Difração de raios X (DRX)</u> .....	45
3.5.5	<u>Ensaio de densidade</u> .....	45
3.5.6	<u>Ensaio</u> .....	de 45

<u>dureza</u> .....	45
3.5.7 <u>Análise do índice de fluidez</u> .....	46
3.5.8 <u>Ensaio de impacto IZOD</u> .....	46
4 <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	50
4.1 <b>Caracterização da muscovita</b> .....	57
4.2 <b>Caracterização dos compósitos</b> .....	59
<b>CONCLUSÕES</b> .....	58
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	60

## INTRODUÇÃO

Compósitos obtidos com base na interação entre polímeros e diversos tipos de minerais têm sido alvo de constantes investigações científicas já que, além da significativa melhoria de propriedades térmicas, químicas e mecânicas em relação à matriz polimérica pura, representam alternativa sustentável ao uso dos polímeros. Ao se adicionar ao material polimérico sistemas particulados de origem natural e em muitos casos resíduos de diversos processos mineradores ou não, reduz-se por um lado a quantidade da resina virgem de polímero a ser usada numa dada aplicação e por outro dar-se uma destinação mais adequada ao resíduos particulados que de outra forma estariam poluindo o meio ambiente (RAJAK, 2019; GERARDO, 2020; BASTOS, 2023).

Dentre os polímeros estudados para formulação de compósitos no sistema polímero/mineral o polipropileno (PP) é bastante citado, isso porque é material de relativamente baixo custo e de fácil obtenção e processabilidade apresentando ainda grandes possibilidades em termos de reciclagem e reaproveitamento (SILVA, 2016).

Destaca-se ainda que o polipropileno é um termoplástico abundante e barato. Possui grande aplicação industrial por apresentar boa resistência química, térmica e mecânica quando comparado a outros polímeros de mesma categoria. Sua aplicação se estende desde o uso em brinquedos e recipientes diversos (copos, alimentos, remédios, etc.) até autopeças (pára-choques, pedais, carcaças de baterias, interior de estofos, lanternas, etc) e cabos para ferramentas manuais (MONSORES, 2017; ALVES, 2018).

Quando processado com incorporação de cargas de reforço, ou seja, na forma de compósito, o polipropileno adquire resistência suficiente para ser utilizado também na obtenção de peças automotivas, eletrônicos, eletrodomésticos e blocos construtivos tradicionalmente feitos em materiais metálicos (MONSORES, 2017; LIXANDRÃO, 2019).

Há diversos tipos de minerais que vêm sendo utilizados como cargas de reforço, a introdução das micas, em particular a muscovita, ganha importância nesse contexto devido ao baixo custo e abundância no Brasil, além das favoráveis propriedades elétricas e térmicas apresentadas por este mineral, que podem agregar valor à matriz polimérica (GERARDO, 2020; ALMEIDA, 2021; GABRYELCZYK, 2022).

A muscovita, no Brasil, é encontrada entre outros na região conhecida como Borborema-Seridó, localizada nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, onde se encontram grandes reservas de rochas pegmatíticas com elevados teores de caulim, feldspato,



quartzo e mica. Nesta região a lavra do mineral é realizada, principalmente, durante as estiagens, quando se torna atividade de subsistência de muitos sertanejos. Em razão do pouco conhecimento técnico no garimpo, a muscovita obtida possui baixo valor agregado (LUZ, 2008; SANTOS, 2009).

Muitos trabalhos encontrados na literatura mostram a utilização da mica e de outros minerais na sua forma natural e resultados potenciais são encontrados, por outro lado muitos estudos revelam que para uma melhoria mais significativa das propriedades dos compósitos do tipo polímero/mineral pesquisas com foco na adição de agentes compatibilizantes ou realização de tratamentos químicos no mineral são essenciais porque contribuem para o aumento da adesão com a matriz polimérica (RASHID, 2011; ISMAIL, 2017; LAPČÍK, 2018).

Pensando sempre em sustentabilidade é importante cada vez mais procurar alternativas de tratamentos que agridam menos possível o meio ambiente e estejam em sintonia com os princípios do desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, o tratamento com ultrassom para minerais mostra-se um método eficaz e que exige maquinário muito simples e pouco ou nenhum aditivo químico, sendo citado na literatura como método *eco-friendly*. Particularmente para minerais de estrutura lamelar, como as micas, o tratamento ultrassônico têm possibilitado a separação das lamelas do material, um processo chamado delaminação, e também diminuição do tamanho de partículas (NOVIKOVA, 2016; BASTOS, 2023).

Particularmente para a mica muscovita, existem entre suas lamelas cátions de compensação ( $K^+$ ,  $Na^+$ , etc) e hidroxilas (OH), de modo que sua delaminação poderia contribuir para melhorar a interação em sistemas polímero/mineral pois criaria pontos de interação do tipo ion-dipolo e dipolo-dipolo que podem melhorar a interação do sistema (SANTOS et al, 2011; NOVIKOVA, 2016; BASTOS, 2023).

## 1 OBJETIVOS

### 1.1 Objetivo Geral:

Desenvolvimento de materiais compósitos com base de polipropileno e carga mineral muscovita, utilizando tratamento ultrassônico para buscar melhor interação entre matriz e carga.

### 1.2 Objetivos Específicos:

- Estudar as melhores condições para realização de tratamento de esfoliação por ultrassonicação da muscovita com vistas à melhoria da adesão do compósito polímero/argilomineral;
- Estudar as melhores condições para obter compósitos entre PP e muscovita tratada ultrassonicamente via processamento em extrusora mono rosca.
- Caracterizar os compósitos obtidos por técnicas químicas, térmicas e mecânicas para evidenciar seu potencial de utilização.

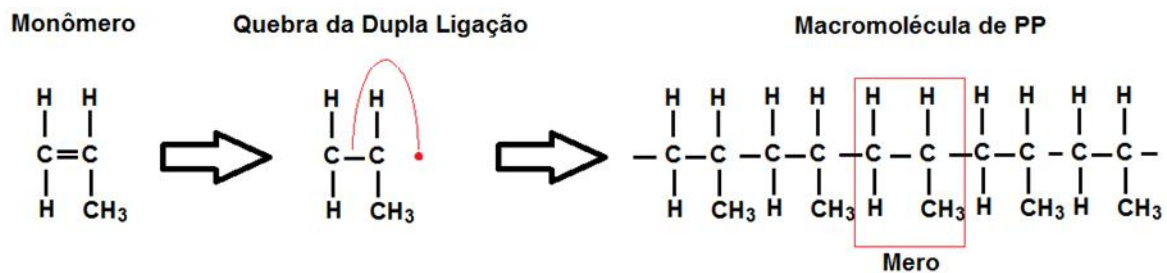
## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Polímeros

Com sua palavra originária do grego que significa: poli (muitos) e meros (partes), os polímeros são macromoléculas formadas por moléculas pequenas (monômeros) que se ligam através de polimerização, e dentre outras classificações, podem ser naturais ou sintéticos (BRITO, 2011).

Sua formação molecular se dá pela quebra de um determinado monômero de um polímero, que se transforma em mero (unidades repetitivas), assim se ligando com outros meros, se tornando uma macromolécula, que é quando as moléculas se tornam muito grandes, contendo um número de átomos encadeados superior a uma centena, e podendo atingir valor ilimitado (MANO, 2004), daí nasce a palavra “polímero”, conforme ilustrado na Figura 1 que exibe esquema da polimerização do polímero polipropileno (PP).

Figura 1 – Etapas de polimerização do PP.



Fonte: NICOLAU, 2006.

As inovações que o plástico, e polímeros em geral, proporciona para diversos setores da economia e da sociedade, além dos benefícios do material para a medicina, saúde e higiene ficam mais evidentes a cada ano. O plástico é um material que está presente em todos os aspectos da nossa vida. Não tem como escapá-lo. É um material durável, versátil e de relativamente baixo custo que representaria, caso descontinuado, um grande regresso para a humanidade. A partir do plástico são criados objetos indispensáveis para o nosso dia a dia e

até para a nossa sobrevivência, se considerarmos, por exemplo, os avanços da medicina proporcionados pelo material (CALLISTER, 2000).

Os polímeros naturais, ou biopolímeros, são aqueles sintetizados pelos organismos vivos, dentre os vários polímeros naturais temos como exemplo o látex natural, a seda, a caseína (proteína do leite) e a celulose (plantas). Os polímeros sintéticos são produzidos de compostos orgânicos, renováveis ou não renováveis, em processos laboratoriais, são exemplos o Polipropileno, o Nylon e o acrílico (BRITO, 2011), conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2—Exemplos de aplicações com polímeros sintéticos.



Legenda: a) Polipropileno; b) Nylon; c) Acrílico

Fonte: GEDELPLASTICOS, 2023.

A essencialidade dos polímeros no nosso dia a dia é extensa assim como os benefícios para a humanidade, vale citar exemplos de aplicações relacionadas à sua atoxidade, como no campo da saúde a utilização de tecidos poliméricos nos centros cirúrgicos, que são feitos a partir de polímeros termoplásticos, que ao mesmo tempo em que têm baixo custo e são descartáveis, representando menos riscos de contaminação, eles também são muito duráveis, concedendo segurança para os pacientes e para os profissionais de saúde. Outro exemplos está na medicação feita utilizando comprimidos com cápsulas de polímero que se decompõem gradualmente, liberando os ingredientes ativos de forma controlada, podendo citar ainda seringas e outros descartáveis como bolsas de sangue, cateteres, tubos, luvas, próteses, suturas, obturações, órgãos artificiais todos feitos em material polimérico (MANO, 2004; VILLANOVA, 2010).

Dentro da área específica de engenharia os polímeros encontram vastas aplicações, existindo atualmente uma significativa quantidade de polímeros de engenharia (ABS -

Acrilonitrila butadieno estireno; LCP - Polímero de cristal líquido; PC - Policarbonato, PBT - Polibutileno tereftalato, etc) que são aqueles com propriedades superiores às *commodities*, são materiais mais estáveis e podem ser aplicados em setores que exigem maior resistência mecânica, térmica, à tração de ruptura, química e às intempéries. Mesmo os polímeros que não são considerados de engenharia podem ter suas propriedades melhoradas, principalmente quando formulados como compósitos, e virem a ter aplicação em setores mais nobres como automóveis, e peças e ferramentas para indústria mecânica, química, elétrica, etc (CANEVAROLO, 2004; CALLISTER, 2000). A Figura 3 mostra exemplos de aplicações de engenharia de alguns polímeros.

Figura 3—Exemplos de aplicações de polímeros de engenharia.



Fonte: PLASTICO MODERNO, 2023.

### 2.1.1 Classificação de polímeros

A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Dependendo de diversos fatores, como tipo de monômero (estrutura química), número médio de meros por cadeia, das presença de ligações e forças intermoleculares, grau de polimerização, grau de cristalização, etc, pode-se classificar os polímeros de diversas formas, uma das mais conhecidas é sua divisão com base nas características químicas e de processabilidade, em que (CALLISTER, 2015; MANO, 2004):

- Plásticos – são os polímeros que sob a ação de pressão e valores relativamente baixos de temperatura calor podem ser moldados, se tornando sólido ao final

do processo. Neste predominam ligações covalente nas estrutura internas e forças fracas entre cadeias.

- Borrachas –deformam-se a partir da baixa tensão mas retornam a sua condição inicial, sem perder significativamente sua forma e suas dimensões, quando a força aplicada é removida. Estes polímeros apresentam-se no estado amorfo e com presença de ligações cruzadas. Não amolecem mediante aquecimento o que causa dificuldades para seu reaproveitamento.
- Fibras –parcialmente reversíveis como os plásticos, são macromoléculas lineares, geralmente orientadas longitudinalmente, possuindo estreita faixa de extensibilidade (CALLISTER, 2015; MANO, 2004).

A Figura 3 mostra um exemplo representativo de aplicação industrial de plásticos, borrachas e fibras.

Figura 4 - Exemplos de aplicações de plástico, borracha e fibra.



Legenda: a) Plástico; b) Borracha; c) Fibra

Fonte : AFINKOPOLIMEROS, 2023; LARPLASTICOS, 2023.

Outra forma de classificação interessante porque afeta pois afetam diretamente o processamento na indústria de transformação (injeção, extrusão, etc.) como também as propriedades físicas e mecânicas de um polímero é aquela com base na diferença de estrutura das suas cadeias moleculares, sua divisão pode ser feita como ilustrado na Figura 4 em: (a) lineares, (b) com ramificação, (c) com ramificações em estrela, (d) escalares, (e) graftizados, (f) semi-escalares e (g) com ligações cruzadas (CALLISTER, 2015).

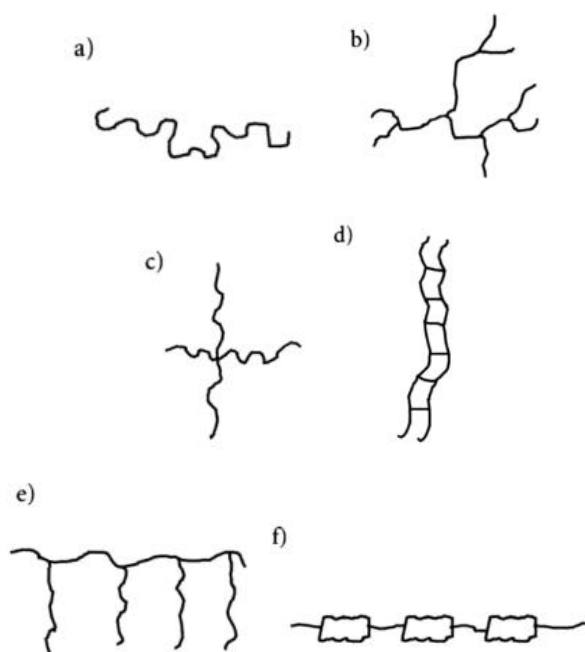
Um terceiro tipo de classificação que vale a pena ser citado pois é muito utilizado nos textos científicos é a classificação com base no comportamento mecânico, em que os

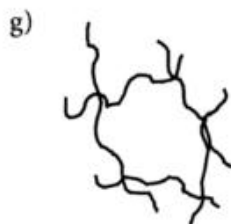
polímeros são chamados de termoplásticos, termofixos (ou termorrígidos) e elastômeros(JORNAL MATÉRIA, 2023).

Os termoplásticos compõem os plásticos, os quais apresentam arranjos lineares ou estruturas ramificadas com cadeias flexíveis. Os termofixos, por outro lado, são polímeros em rede ou seja apresentam ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. Com isso, após o processo de solidificação, conhecido como cura, o material torna-se rígido e não amolece sob aquecimento. Já os elastômeros, chamados genericamente de borrachas, apresentam a habilidade de serem deformados em níveis elevados, e retornarem elasticamente às suas formas originais. Isso é resultado das ligações cruzadas presentes no polímero, as quais permite o retorno da cadeia às suas conformações não deformadas (JORNAL MATÉRIA, 2023).

Os polímeros que utilizamos no dia-a-dia para os usos mais comuns (utensílios domésticos, objetos diversos, embalagens, etc) estão mais frequentemente incluídos na classe dos plásticos, como destaque polietileno (PE), polietileno tereftalato (PET), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS) e polipropileno (PP), a Figura 5 mostra a organização das cadeias dos polímeros.

Figura 5 –Formas comuns de orgnização das cadeias dos polímeros.





Legenda: a) linear; b) ramificado; c) com ramificações em estrela; d) escalar; e) graftizado; f) semi-escalar; g) com ligações cruzadas.

Fonte: Adaptado de LENI AKCELRUD, 2007.

### 2.1.2 Polipropileno

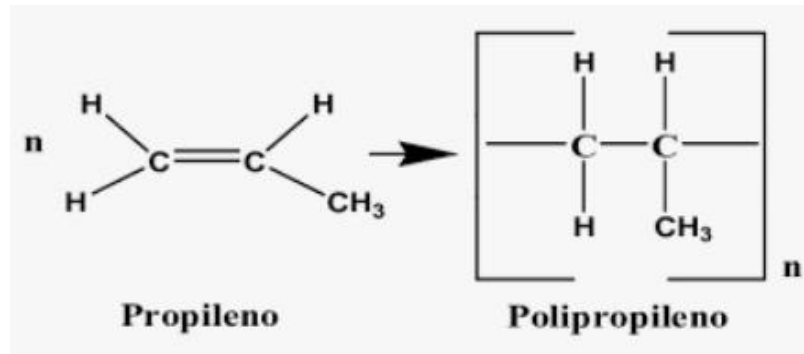
O polipropileno é um polímero termoplástico abundante e relativamente barato, produzido a partir da polimerização do gás propileno ou propeno. É considerado *commodities* por sua elevada produção para aplicações comuns e consumidos em grande escala (ROSA, 2007; CASTRO, 2014).

A polimerização propriamente dita realiza-se ligando as unidades monoméricas, que são substâncias insaturadas, abrindo as suas ligações duplas ou estruturas cíclicas. A ligação ocorre sem separação de moléculas únicas, de modo que a composição centesimal do polímero é a mesma que a do monômero inicial (FERNANDES, 2007).

Em qualquer processo de polimerização, conforme exemplificado para o polipropileno na Figura 5, existem três fases características, que são: a reação de iniciação, a reação de crescimento ou de propagação em cadeia e a reação de quebra ou de terminação. A reação inicial é a que produz a ativação da dupla ligação, um processo prévio necessário para o encadeamento dos monômeros nas reações de crescimento. A reação de ruptura é a reação que interrompe o crescimento irrestrito da cadeia de polímeros. A ativação da dupla ligação na reação de iniciação pode ser iniciada por luz, calor, ultra-sons, formadores radicais ou catalisadores ácidos e básicos, na Figura 6 pode-se observar a reação de polimerização do polipropileno (ROSÁRIO, 2011).

Figura 6 –Esquema simplificado da reação polimerização do polipropileno a partir do monômero propileno.

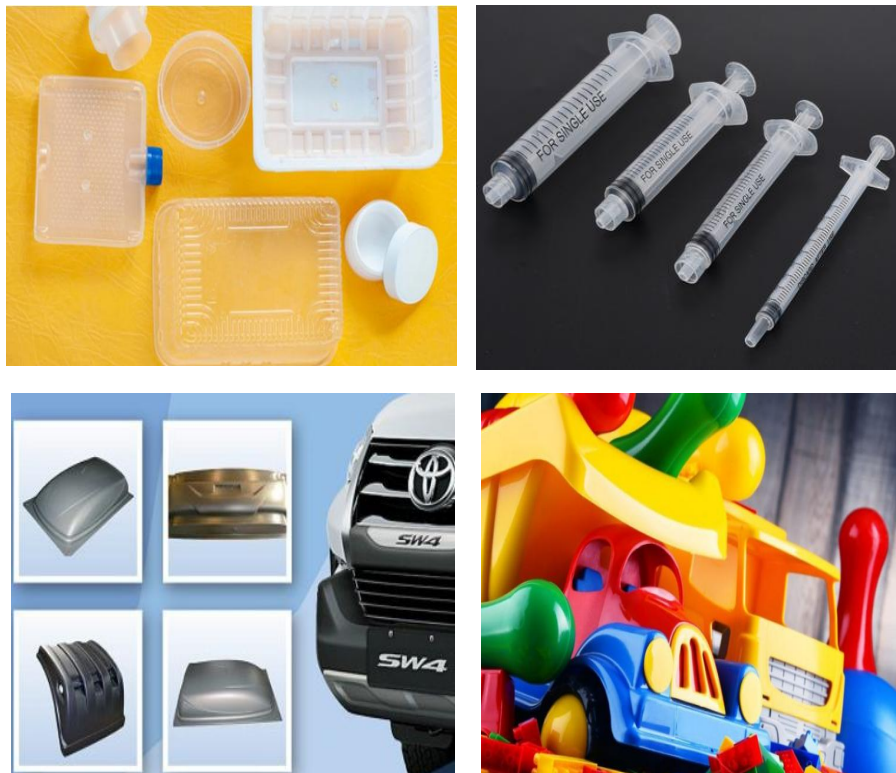




Fonte: adaptado de PETRY, 2011

O PP possui grande aplicação industrial por apresentar boa resistência química, térmica e mecânica quando comparado a outros polímeros de mesma categoria. Sua aplicação se estende desde o uso em brinquedos e recipientes diversos (copos, alimentos, remédios, etc.) até autopeças (para-choques, pedais, carcaças de baterias, interior de estofos, lanternas, etc) e cabos para ferramentas manuais (ALVES, 2018). A Figura 7 exhibe exemplo de usos comuns do PP.

Figura 7—Exemplos de aplicações do polipropileno.



Fonte: SISPLAST, 2023.

Por se tratar de um material de relativamente baixo custo, o polipropileno permite a criação de produtos com um preço competitivo, além disso, o mesmo é reciclável, o que significa que o impacto ambiental provocado pelo seu uso pode ser minimizado (ROSÁRIO, 2011).

O polipropileno também é resistente à flexão e impacto, por isso, suas peças têm uma ótima durabilidade. Ele é um tipo de plástico livre de Bisfenol A (BPA), o que torna seus produtos seguros para o manuseio de bebês e crianças. Outras características interessantes são a baixa absorção de umidade e resistência a temperaturas de -10°C até 60°C o que possibilita, por exemplo, que seus produtos de cozinha podem ir ao *freezer* e ao micro-ondas (OLIVEIRA, 2013).

A versatilidade do polipropileno também está presente nas formas como pode ser processado, sendo elas: injeção, extrusão de filmes, extrusão de filamentos, termoformagem e sopro (OLIVEIRA, 2013).

Apesar de sua versatilidade e larga aplicação, o PP apresenta instabilidade dimensional e limitações de resistência ao impacto e termoformabilidade para algumas aplicações. Porém quando processado com incorporação de cargas de reforço, ou seja, na forma de compósito, o polipropileno adquire resistência suficiente para ser utilizado em setores mais nobres como na obtenção de peças automotivas, eletrônicos, eletrodomésticos e blocos construtivos tradicionalmente feitos em materiais metálicos (FERNANDES, 2007).

Um exemplo de estudo focado na obtenção de compósitos de PP com propriedades melhoradas pode ser encontrado no trabalho de SPADETTI, 2017. Nesta pesquisa foram investigadas as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de polipropileno reciclado e virgem, reforçados com fibras de celulose, em que observou-se que tanto as amostras de PP reciclado como aquelas com polímero virgem apresentaram aumento da rigidez e do grau de cristalinidade, além de que as análises de MEV, confirmaram a boa dispersão da fibra nas matrizes de PP.

Apesar da tendência atual está mais direcionada a estudos científicos com foco em polímeros reciclados ou pós-consumo, as investigações com foco em melhorias da resina virgem são ainda muito importante pois, além do fato que essas resinas virgens ainda serão utilizadas por muito tempo, ao se evidenciar por meio das pesquisas científicas que esses materiais podem ser utilizados em menor quantidade ao se introduzir em sua estrutura cargas de diversos tipos, também se contribui para sustentabilidade em geral.

## 2.2 Mica Muscovita

A mica é um filossilicato a base de alumínio, potássio ou sódio e muitas vezes magnésio e ferro. Este mineral pode ser encontrado em todas as partes do mundo; estima-se que os maiores depósitos geológicos de mica situam-se na África do Sul, Brasil, Índia e Rússia. Depósitos também importantes mas de menor expressão, localizam-se na Argentina, Austrália e Zimbábue, estes de flogopita (SIRELI, 2008). A Figura 8 exibe um exemplar de mica muscovita oriundo da região nordeste do Brasil.

Figura 8 – Mica do tipo muscovita do nordeste do Brasil.

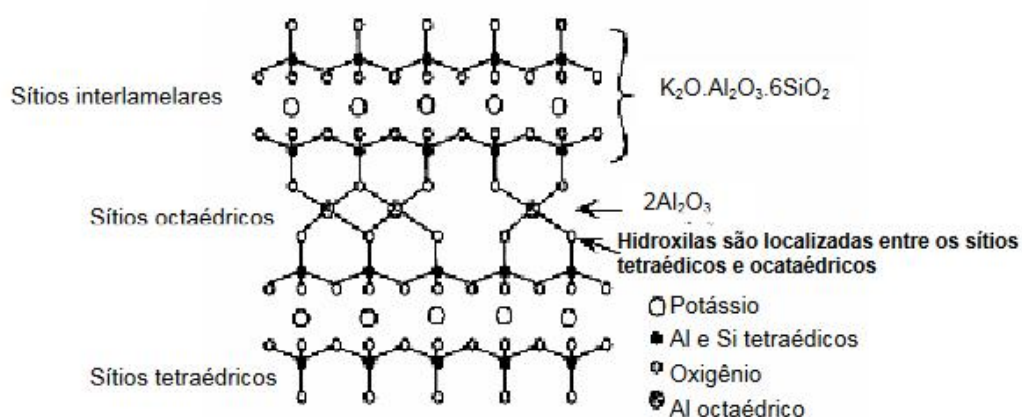


Fonte: SANTOS, 2009.

As micas podem ser descritas a partir da formulação geral  $X_2Y_{4-6}Z_8O_{20}(OH,F)_4$ , em que X é K, Na, ou Ca, Y é principalmente Al, Mg ou Fe e Z é principalmente Si ou Al e em alguns casos Fe e Ti. As micas podem ser dioctaédricas e trioctaédricas em que o número de íons Y é 4 ou 6 respectivamente (KOGEL, 2006).

Os minerais de mica mais conhecidos são: muscovita, biotita, lepidolita, glauconita, paragonita, flogopita. Especificamente a mica muscovita apresenta estrutura lamelar, arranjada na forma de duas camadas tetraédricas de sílica entre as quais se interpõe uma camada octaédrica de alumina, entre as camadas estão presentes cátions de compensação, como potássio, lítio, sódio ou cálcio, conforme esquematizado na Figura 9 (SANTOS, 2009; NAVARRO, 2017).

Figura 9 – Estrutura da mica muscovita projetada no plano (010).



Fonte: PAPIPER, 1990.

Em geral, as micas apresentam excelente resistência a intempéries, boa resistência química, baixa condutividade térmica, estabilidade em altas temperaturas, características de não inflamabilidade, baixa condutividade elétrica, alta rigidez dielétrica e baixo fator de dissipação, fatores que sempre levaram a mica a ser amplamente utilizada na indústria (SIRELI, 2008).

A mica com maiores aplicações e usos comerciais é a do tipo muscovita, podendo ser encontrada em vários lugares do mundo, porém nem todas as localidades produzem material de alto rendimento, a Figura 10 ilustra a muscovita, ainda incrustada na rocha, proveniente da província pegmatítica da Borborema (RN) localizada na região nordeste do Brasil (SANTOS, 2009).

Figura 10: Muscovita da província pegmatítica da Borborema (RN) no Brasil.



Fonte: SANTOS, 2009.

No Brasil, as micas são encontradas em diversas regiões pegmatíticas, a exemplo das ocorrências pré-cambrianas da província pegmatítica da Borborema, localizada na borda ocidental do Planalto da Borborema e na região do Seridó, nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Nessa região há centenas de corpos pegmatíticos encaixados em micaxistos, quartzitos e gnaisses. Outras ocorrências importantes de pegmatitos no Brasil são as da região de Governador Valadares (Minas Gerais) e de Perus (São Paulo). A muscovita também ocorre em alaskitos, em rochas metamórficas (xistos e gnaisses) e em rochas sedimentares (LUZ, 2008).

Na composição mineralógica dos pegmatitos predominam os feldspatos, quartzo e micas (moscovita e biotita). Outros minerais freqüentemente encontrados são: turmalina, berilo, espodumênio, tantalita, columbita, cassiterita e minerais de terras raras, entre outros (LUZ, 2008).

Os pegmatitos são rochas ígneas, plutônicas, geralmente associadas com granitos, e que se apresentam predominantemente em forma de diques (veios e lentes) preenchendo fraturas de rochas pré-existentes (CASTRO, 2004; JATOBÁ, 2004).

A fácil clivagem no plano basal, que permite a separação em lâminas muito finas; plasticidade; baixa condutividade térmica e elétrica; resistência a mudanças abruptas de temperatura, brilho vítreo, e coloração variando de incolor a verde são as principais propriedades da mica muscovita. Outras importantes propriedades da muscovita estão listadas na Tabela 1 abaixo (KOGEL, 2006).

Tabela 1 – Propriedades físicas da muscovita

<b>Propriedades</b>	
Módulo de Elasticidade (Pa.10 <sup>9</sup> )	172
Resistência à Compressão (Pa.10 <sup>6</sup> )	221
Resistência à Tração (Pa.10 <sup>6</sup> )	225-297
Temperatura de Decomposição(°C)	600
Massa específica (g/ cm <sup>3</sup> )	2,77-2,88
Dureza (Mohs)	2,8-3,2
Constante Dielétrica	6,5-9,0

Fonte: SANTOS, 2009.

O método de lavra utilizado para a produção de muscovita depende, naturalmente, das condições da ocorrência e do tipo de minério. Particularmente na região do Seridó (estados da Paraíba e Rio Grande do Norte) a muscovita é obtida, de pegmatitos, por meio de operações rudimentares de lavra realizada frequentemente como atividade de subsistência por ocorrência da estação de seca. Desta forma, o mineral obtido apresenta baixo valor agregado e geralmente é exportado a baixo custo para outros países que realizam seu beneficiamento e muitas vezes revendem o produto industrializado a preços exorbitantes (SANTOS, 2009).

A muscovita é usualmente utilizada na forma de folha ou moída, como pode ser observado na Figura 11 que mostra uma amostra de muscovita na frente de lavra (esquerda) e moída (direita). A mica folha pode ser classificada com base na cor e na espessura das lâminas (blocos > 180  $\mu\text{m}$ ; filmes 20-180  $\mu\text{m}$ ; “splittings” < 30  $\mu\text{m}$ ) (SANTOS, 2009).

As principais aplicações da muscovita em folha estão na indústria de eletro-eletrônicos, devido à sua elevada resistência térmica e constante dielétrica. Algumas aplicações deste tipo de muscovita são: na fabricação de janelas de microondas, condensador, transistor, isolante intercarnada, tubos de vácuo, etc (BALTAR, 2008).

A maior aplicação industrial (59%) de mica moída a seco (150  $\mu\text{m}$ ) é na fabricação de placas para revestimento de parede. O segundo grande mercado (15%) é na indústria de tintas para aplicações onde deslizamento e brilho não sejam importantes. Outras aplicações importantes incluem usos na indústria de cosméticos e como carga inerte para plásticos onde a mica atua melhorando principalmente as propriedades mecânicas (SANTOS, 2009; ALMEIDA, 2021; GERARDO, 2020; BASTOS, 2023).

Figura 11 – Muscovita folha (esquerda) e moída (direita).

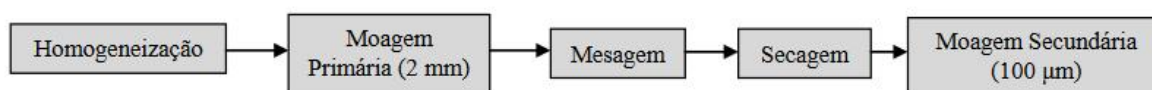


Fonte: SANTOS, 2009.

Para qualquer das aplicações citadas a muscovita, e os minerais em geral, necessitam passar por métodos de beneficiamento para retiradas de impurezas e adequação das características do mineral ao uso que se pretende realizar. Para a muscovita moída é necessário além da purificação a sua micronização, que não é um procedimento óbvio (SANTOS, 2011).

Alguns estudos encontrados na literatura, mostram avanços no beneficiamento da muscovita (SANTOS, 2011; MONSORES, 2017), como no trabalho de CASTRO (2014), cuja rota de beneficiamento está ilustrada na Figura 12, que mostra que a muscovita na forma de matéria prima natural foi tratada por um método relativamente simples, incluindo cominuição com uso de moinho de facas, que é um procedimento relativamente barato e fácil de executar, além de não utilizar água ou outros líquidos, o que representa uma economia no processo, propondo assim uma rota alternativa para a produção de muscovita moída a seco.

Figura 12 – Exemplo de rota de beneficiamento da mica muscovita.



Fonte: MONSORES, 2017 (adaptado).

### 2.2.1 Ultrassonicação de Minerais

Como definição geral, o ultrassom se caracteriza como uma forma de onda acústica, com frequências superiores a 20 KHz. É integrada a partir de um gerador de corrente elétrica de alta-frequência ou de baixa frequência, conectado a uma cerâmica piezoelétrica sintética (materiais que geram energia elétrica quando sofrem determinada pressão mecânica em seus cristais) na presença de um campo elétrico (BORGES, 2006).

As ondas ultrassônicas podem ser aplicadas por dois métodos conhecidos como contínuo e pulsado. A diferença entre os métodos está na continuidade da emissão da onda ultrassônica que resulta principalmente na geração de calor. Os efeitos térmicos produzidos pelo ultrassom contínuo ocorrem pela vibração mecânica constante dos corpos por este

incididos. Fato que não ocorre no modo pulsado, pois a emissão é interrompida intercalando pausas, fazendo com que o calor seja dissipado (AGNE, 2004).

De 1940 até os dias atuais, o ultrassom vem sendo extensamente usado e novos efeitos e aplicações vem sendo investigados, tanto na área médica como na indústria. A primeira aplicação prática do ultrassom foi em 1917 com a criação de sonares para a detecção de submarinos, utilizando o método pulso-eco. Alguns anos mais tarde, descobriu-se que o ultrassom produzia aumento da temperatura em tecidos biológicos, entre 1930 e 1940 ele foi introduzido na prática médica como um recurso terapêutico em diversos tipos de tratamentos e para os tão conhecidos exames de ultrassonografia (BASSOLI, 2001).

Nas últimas décadas o uso do ultrassom continua sendo aperfeiçoado e encontrado novas aplicações como na detecção de objetos e medição de distâncias. Na área de engenharia vem sendo usado em testes não destrutivos para detectar falhas em produtos e estruturas. Encontra também bastante usos na área química onde é usado para limpar, misturar, acelerar processos químicos e desaglomerar materiais particulados em suspensão.

A capacidade do ultrassom de ser usado para desaglomerar pós em suspensão, quando utilizada para minerais pode proporcionar, além do efeito usual, diminuição do tamanho de partícula, delaminação para minerais de estrutura lamelar e outras alterações físicas e químicas, como amorfização da estrutura, quebra de ligações e outras.

No trabalho de NOVIKOVA (2016), por exemplo, investigou-se o efeito da ultrassonicação com frequência de 20KHz em meio aquoso e usando peróxido de oxigênio por tempo de 0-120 minutos sobre a estrutura de vários minerais aluminossilicatos. Os autores observaram um comportamento geral de diminuição do tamanho médio de partículas para todas as amostras tratadas em água e para algumas amostras tratadas com ultrassom por 120 minutos uma diminuição da intensidade dos picos que foi atribuído à redução da cristalinidade dos minerais.

No estudo de SANTOS, 2011, também foi investigado o efeito do uso do ultrassom (20KHz, 60 min) aplicado ao mineral muscovita. Neste projeto também foi utilizado o meio aquoso e foi possível verificar uma diminuição significativa da distribuição de tamanho de partículas, que se tornou mais estreita com partículas mais finas e ocorrência de delaminação (separação das lamelas) do mineral.

Outros estudos tem reportado alterações no comportamento térmico, densidade e distribuição de cátions de vários minerais (PÉREZ-MAQUEDA, 2004).

Alguns autores sugerem que o efeito provocado pelo ultrassom que consegue gerar a redução do tamanho de partículas e delaminação em minerais é a cavitação. De forma



simplificada, neste processo há formação, crescimento e colapso de bolhas microscópicas geradas pelas ondas ultrassônicas, ao se romperem as bolhas liberam grande quantidade de energia que ocasiona potentes colisões entre as partículas. A Figura 13 esquematiza o que acontece no processo de cavitação (FRAGASSA, 2016; PÉREZ-MAQUEDA, 2004; NOVIKOVA; 2016).

Figura 13 – Esquema da formação, crescimento e colapso de bolhas na cavitação



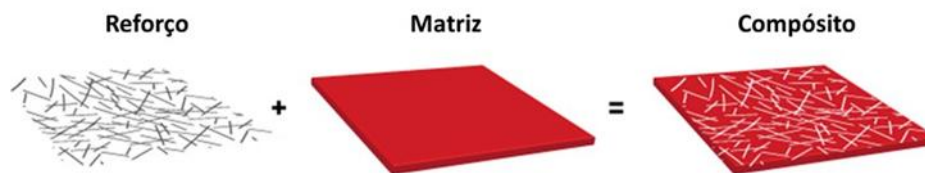
Fonte: FRAGASSA, 2016 (adaptado).

### 2.3 Compósitos

Os materiais compósitos são materiais heterogêneos e multifásicos, sendo compostos por dois materiais com propriedades físicas e químicas complementares, orientadas pelo princípio da ação combinada. Esse princípio define que as melhores combinações de materiais são feitas a partir de uma escolha estratégica que envolve o benefício que um material pode agregar ao outro, juntos, estes formam um novo material com propriedades melhoradas, sendo classificados por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço) (VÄISÄNEN, 2016).

A fase matriz é contínua, abriga a fase dispersa e geralmente é responsável por dar conexão ao material. Já a fase dispersa é responsável pelas propriedades mecânicas do material em função de sua forma, tamanho, distribuição e orientação, portanto a adesão dos materiais envolvidos é um fator de extrema importância e deve ser considerado, uma vez que o mesmo define a forma como o reforço se comportará quando solicitado na matriz (PICKERING, 2016). A Figura 14 exibe um esquema geral da ideia da relação carga/matriz num compósito.

Figura 14 – Esquema geral da relação carga/matriz num compósito.



Fonte: FIBRENAMICS, 2023 (adaptado).

Partindo da idéia central que define o material compósito, por exemplo, dois materiais diferentes mantêm suas propriedades individualmente, mas quando misturados, vão apresentar um comportamento distinto do apresentado por ambos quando não misturados. Como exemplos de matrizes podemos citar os metais, polímeros e as cerâmicas, como exemplos de alguns materiais de reforço para compósitos estão as fibras (de vidro, carbono, orgânicas, de carbono ou silício, entre outras), assim como a madeira, o grafite e os minerais (talco, carbonato de cálcio, mica, wollastonita entre outras) (BAKHTIAR, 2018).

Desde tempos remotos pode-se mencionar a utilização de compósitos pelo homem, uma vez que antigas civilizações já obtinham tijolos pela mistura úmida de barro e palha. Na atualidade, os compósitos, embora também utilizados no nosso cotidiano, em geral encontram maior campo de aplicação em setores que requerem material performance aperfeiçoada, como na indústria aeroespacial. Alguns outros exemplos representativos incluem o colete à prova de balas, a vara utilizada no salto com varas, barcos, pranchas de surf, pás de um helicóptero, raquetes de tênis, entre outros (COSTA, 2014).

Ainda no meio industrial, quando se utiliza um material compósito de modo a se buscar propriedades elétricas, magnéticas, térmicas ou ópticas desejadas, esse material recebe a denominação de um compósito funcional (COSTA, 2014).

### 2.3.1 Compósitos com matriz polimérica

Materiais compósitos nos quais a fase contínua é um polímero ou uma mistura de polímeros são chamados compósitos de matriz polimérica. A formulação destes materiais, geralmente, têm por objetivo principal criar um produto que aproveite boa parte das propriedades do polímero, como seu baixo peso específico, alta resistência a corrosão, flexibilidade de formas, etc e acrescente propriedades melhoradas como resistência mecânica,

na intenção de formar um compósito que atenda aos quesitos de sustentabilidade e que possua um baixo custo de processamento (ROMÃO, 2003).

A versatilidade dos materiais polímeros se estende aos seus compósitos, sendo possível encontrar na literatura uma grande variedade de tipos de polímeros e de cargas, incluindo fibras naturais (sisal, juta, coco, etc) e sintéticas (fibras de vidro, etc), substâncias inorgânicas ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , etc), minerais (flogopita, bentonita, micas, caulim, talco, etc) e inclusive cargas metálicas (DALPIAZ, 2006).

Só para exemplificar um caso de carga metálica utilizada em polímero, no trabalho de DANES (2003) com o intuito de aumentar a condutividade térmica do plástico de engenharia polibutileno tereftalato foi feita a adição de carga condutora de fibra curta de alumínio. Os pesquisadores observaram aumento da condutividade do compósito dependendo do tamanho, formato e teor das fibras na fase polimérica.

Um exemplo representativo do uso de carga de origem vegetal pode ser encontrado no trabalho de PEREIRA (2017) que processou e caracterizou materiais compósitos com matriz epóxica, reforçados com fibras curtas de origem vegetal, onde foi possível desenvolver uma cadeira e um abrigo modular. Como resultado, foi possível observar um aumento significativo de densidade e um melhor comportamento em termos de isolamento térmico.

Focando para o tema compósito polímero/mineral, a utilização de cargas minerais em matrizes poliméricas tem sido alvo de estudos em todo o mundo e diversos tipos de melhoria tem sido alcançados por estes materiais. Alguns exemplos são redução de custo, melhora do processamento, controle de densidade, efeitos óticos, retardamento de chama, reforçadas propriedades mecânicas, tais como a dureza e a resistência ao impacto e propriedades térmicas (WIN, 2005).

No trabalho de MONSORES (2017), foi realizado o desenvolvimento de compósitos com matriz de polipropileno e com carga de reforço de mica do tipo muscovita, esta com granulometria inferior a  $45\mu\text{m}$ . As misturas foram processadas em extrusora monorosca e o teor de mica (*in natura*) foi variado de 0 – 20%, tendo sido observado os melhores resultados com o teor de mica de 15%. No geral, as amostras de compósitos apresentaram uma tendência ao aumento da densidade e da dureza com aumento do teor de mica e diminuição da fluidez, confirmando a ação reforçante do mineral na matriz polimérica e sugerindo uma interação física do mineral com o polímero. Entretanto o módulo de elasticidade não exibiu incremento significativo com introdução da mica o que foi associado à necessidade uso de um compatibilizante para melhorar a dispersão da carga no PP.

No estudo de ALMEIDA (2021) também se investigou a influência da variação do teor de mica muscovita (0 – 20%) na obtenção de compósitos com madeira plástica. Melhoria de propriedades como densidade, dureza e MFI (índice de fluidez) foi observada com aumento do teor de mica (-100 $\mu$ m) até a concentração de 15%. Esse sistema investigou também a qualidade da adesão polímero/carga por meio de análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfícies criogenicamente fraturada as amostras. Uma boa adesão entre as fases foi observada e atribuída a presença de aditivos na própria madeira plástica, os quais são adicionados para facilitar o reprocessamento da mistura de polímeros contida neste tipo de material.

O sistema madeira plástica/muscovita foi também investigado por GERARDO, 2020, onde a proporção de mica foi mantida constante a 15% e variou-se o tamanho de partícula do mineral (-125, -106, -75 and -45 $\mu$ m). Os autores verificaram que os tamanhos de partícula estudados não alteraram significativamente as propriedades do compósitos, o que foi considerado um resultado positivo dado que a obtenção de mineral em tamanhos menores envolve, usualmente, elevado consumo de energia particularmente para minerais lamelares de elevada plasticidade como as micas. Neste estudo também a relativa boa adesão entre as fases foi atribuída a presença de aditivos na própria madeira plástica.

A própria diferença de natureza química entre matrizes poliméricas (orgânicas e apolares) e cargas minerais (inorgânicas e polares) dificulta a interação entre os dois materiais. Essa incompatibilidade faz com que, muitas vezes, a carga mineral não se distribua de forma homogênea, tendendo a formar aglomerados que pioram a adesão com a matriz. Usualmente são realizados tratamentos químicos do mineral e/ou uso de aditivos compatibilizantes para vencer essa dificuldade (RASHID, 2011; ARAÚJO, 2004).

No trabalho de RASHID, 2011, realizou-se um tratamento químico em mica do tipo muscovita para tentar aumentar a interação polímero-carga. A mica foi submetida a um tratamento de troca iônica. Uma molécula de natureza orgânica (Brometo de octadeciltrimetilamonio) foi trocada pelo íon potássio; por meio das análises de FTIR e microscopia eletrônica de varredura evidenciou-se grande melhora na adesão entre os compósitos de mica (10-40%) e uma matriz de epóxi, além de aumento na resistência a flexão (até 20% de mica), tenacidade à fratura (até 40% de mica) e propriedades elétricas (até 20% de mica).

Um exemplo de uso de aditivo num sistema polímero/carga inorgânica pode ser encontrado no trabalho de GRISON (2015). Neste estudo foram obtidos compósitos entre polietileno de alta densidade (PEAD), pó de madeira, alumina calcinada e dois agentes

compatibilizantes (2% de polietileno graftizado com anidrido maleico ou 0,5% viniltriétoxissilano). Verificou-se que a utilização do silano não proporcionou efeito adicional nas propriedades mecânicas dos compósitos já o uso do anidrido maleico contribuiu para melhorar a interação entre a matriz polimérica e as cargas.

O uso de tratamentos químicos e aditivos é algo que incontestavelmente traz resultados positivos no aumento da compatibilização de sistemas polímero/carga inorgânica, entretanto o não uso de aditivos e tratamentos ou aplicação de métodos ambientalmente amigáveis estaria em maior sintonia com os conceitos de sustentabilidade buscados pelo mundo atual. Dessa forma o uso do ultrassom para delaminar minerais, como a muscovita, e com isso favorecer a interação em compósitos de matrizes poliméricas é um tema interessante a ser investigado.

TAKEI, 2013 traz em seu trabalho resultados desse tipo, ou seja, utilizou um tratamento ultrassônico a 28 kHz, considerado de baixa frequência, em meio aquoso com adição de dispersantes em minerais de sepiolita para obtenção de compósitos com a borracha NBR. O mineral utilizado tem estrutura fibrosa, de modo que o efeito ocasionado pela sonicação foi uma melhoria da dispersão que resultou, entre outros resultados, em aumento na resistência à tração de 3 para 8 MPa foi para os compósitos obtidos.

Outro exemplo deste tipo de estudo pode ser encontrado no trabalho de BASTOS (2023), no qual analisou-se o efeito da ultrassonicação em muscovita (-125 $\mu$ m). O tratamento foi realizado em meio aquoso, sem adição de nenhum aditivo químico por tempos de 30 e 60 minutos. Por meio das imagens de MEV e medidas do tamanho de partícula, os autores observaram a ocorrência de delaminação e diminuição do tamanho de partícula do mineral à proporção que o tempo de tratamento com ultrassom foi aumentado. Os compósitos obtidos exibiram, entre outros resultados, um significativo aumento na resistência ao impacto e melhoria da dispersão da mica nos compósitos obtidos. A melhoria da adesão foi associada a existência de mais pontos de interação, devido a delaminação, que expõe as regiões lamelares contendo cátions que podem promover aumento das forças fracas do tipo dipolo-dipolo e íon-dipolo.

Apesar de se mostrar um método eficaz e *eco-friendly*, a busca bibliográfica por estudos focando no uso de tratamentos ultrassônicos em minerais visando à melhoria da adesão com matrizes poliméricas se mostrou pouco proveitosa já que poucos trabalhos foram encontrados. Particularmente para o sistema polipropileno/muscovita nenhum estudo científico foi encontrado até o momento.

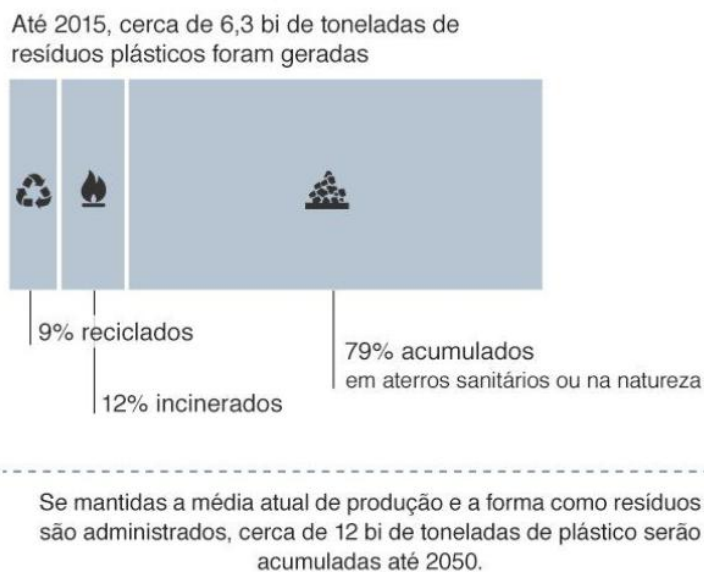
## 2.4 Sustentabilidade

Num contexto que é marcado pela permanente degradação do meio ambiente e seu ecossistema, refletir sobre práticas que envolvem o cotidiano social, cria a necessidade de articulação relativa à educação ambiental. Devido a sua dimensão e importância, a preocupação com o meio ambiente, deve ser de responsabilidade crescente de todos, incluindo principalmente, o conjunto de atores do universo educativo, de maneira a potencializar a interação de profissionais com a comunidade universitária, através de uma perspectiva interdisciplinar e de apoio mútuo. O desafio que se apresenta, é o de formular uma educação ambiental crítica e inovadora e tratá-la acima de tudo, como um ato político totalmente voltado para a transformação social, buscando uma perspectiva que relaciona o homem, a natureza e o universo, tendo como referência que os recursos naturais se esgotam e que o principal responsável pela sua degradação é o ser humano (GADOTTI, 2008).

O desenvolvimento sustentável abriga um conjunto de paradigmas para o uso dos recursos que visam atender as necessidades humanas. Em 1987 no *Relatório Brundtland* da Organização das Nações Unidas que estabeleceu que desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que "satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades". Ele deve considerar a sustentabilidade ambiental, econômica e sociopolítica. Dentro da questão ambiental (água, ar, solo, florestas e oceanos), ou seja, tudo que nos cerca precisa de cuidados especiais para que continue existindo. Portanto, as sustentabilidades econômica e sócio-política só têm existência se for mantida a sustentabilidade ambiental (PEREIRA, 2012).

Tendo em vista a alta utilização por parte da população como um todo, em virtude de uma série de características vantajosas, como resistência química e mecânica, os termoplásticos, durante todo ciclo de vida, são exemplos de materiais que constituem uma problemática relevante dentro das políticas sustentáveis, devido aos impactos gerados no aspecto ambiental, social e econômico, pois sua forma de utilização em produtos com tempo de vida útil curto, como embalagens, acabam gerando um grande acúmulo de lixo. Esse lixo demora cerca de 200 a 600 anos para se decompor no meio ambiente, o que gera poluição de solos, rios, mares e prejudica todo ecossistema do planeta, na Figura 15 pode-se perceber a tendência de aumento desta problemática de acordo com a administração de resíduos plásticos no mundo (WRIGHT, 2022).

Figura 15– Administração de resíduos plásticos.



Fonte: SCIENCE MAGAZINE, 2017.

Os bens minerais também têm uma importância significativa para a sociedade, levando-se em conta que as fases de evolução da humanidade são divididas em função dos tipos de minerais utilizados: idades da pedra, do bronze, do ferro, etc. As civilizações dependem de maneira global dos minerais, principalmente quando se pensa em qualidade de vida, uma vez que as necessidades básicas do ser humano - alimentação, moradia e vestuário - são atendidas essencialmente por estes recursos (TRIGUEIRO,2005).

Cerca de 10 toneladas/ano de produtos do reino mineral, abrangendo 350 espécies minerais distintas, são consumidas direta ou indiretamente por pessoa no mundo. A construção de uma residência é um exemplo desta diversidade.

A atividade mineral disponibiliza para a sociedade recursos minerais essenciais ao seu desenvolvimento, sendo a intensidade de aproveitamento dos recursos um indicador social. Tomando como exemplo o consumo per capita de agregados para a construção civil (areia + brita), este reflete a real intensidade estrutural de uma sociedade, pois está associado diretamente às vias de escoamento de produção, obras de arte, como viadutos e pontes, saneamento básico, hospitais, escolas, moradias, edifícios, energia elétrica e toda sorte de elementos intrínsecos ao desenvolvimento econômico e social de um povo (CAPRA, 2007).

O crescimento sócio-econômico implica em maior consumo de bens minerais, tornando importante garantir a disponibilidade dos recursos demandados pela sociedade.

Existe portanto, uma relação direta entre desenvolvimento econômico, qualidade de vida e consumo de bens minerais.

O caráter desbravador da mineração resulta em novas fronteiras econômicas e geográficas, abrindo espaço para o desenvolvimento e gerando oportunidades econômicas. Como indústria de base, induz à formação da cadeia produtiva, do processo de transformação de minérios até os produtos industrializados. Na medida que proporciona a interiorização da população, cria demandas por infra-estrutura e serviços, induz a instalação de indústrias de transformação e de bens de capital, gera empregos e renda, reduzindo as disparidades regionais.

A mineração é reconhecida internacionalmente como atividade alavancadora do desenvolvimento, tendo grande participação no desenvolvimento econômico de muitas das principais nações do mundo, como: Canadá, Austrália e Estados Unidos (NUNES, 2009).

Os tipos de mineração referem-se à lavra, que consiste na técnica de extrair minério. Há vários métodos de lavra, que variam conforme os métodos de extração que são realizados nas minas. Em uma área de mineração, pode ser empregado mais de um método de lavra.

Os dois principais métodos de lavra são: Lavra a céu aberto ou de superfície: consiste na extração de minérios que estão depositados próximos à superfície. Esse método explora o minério até o seu esgotamento. Suas principais técnicas são: encostas, cavas, fatias e lavra por dissolução e Lavra subterrânea: consiste na extração de minérios que estão depositados longe da superfície. Esse método explora o minério via sonda e por meio de serviços topográficos. As principais variações dessa lavra são: realces com autoportantes, realces com encaixantese abatimento (TEIXEIRA, 2001).

Além de levar em conta as características da área a ser explorada, como profundidade e aspectos geológicos, a escolha dos métodos de lavra deve considerar também os aspectos sociais, econômicos e ambientais. A escolha do método deve ater-se também às questões de segurança e higiene, para que se garanta a vida útil da mina. Sendo assim, a falta de planejamento ou a escolha errada do método pode provocar diversos danos ambientais (LUZZI, 2005).

A intensa demanda pelos bens minerais que vigorou no passado, associada à falta tanto, de soluções tecnológicas adequadas, quanto de prioridade para a conservação ambiental na agenda dos governos atrela a imagem da mineração como uma atividade agressiva ao meio ambiente e aos interesses do desenvolvimento sustentável. Esta combinação de fatores induziu o desenvolvimento de uma indústria mineral predatória, bastante generalizada no Brasil até épocas recentes da nossa história (JACOBI, 2006).



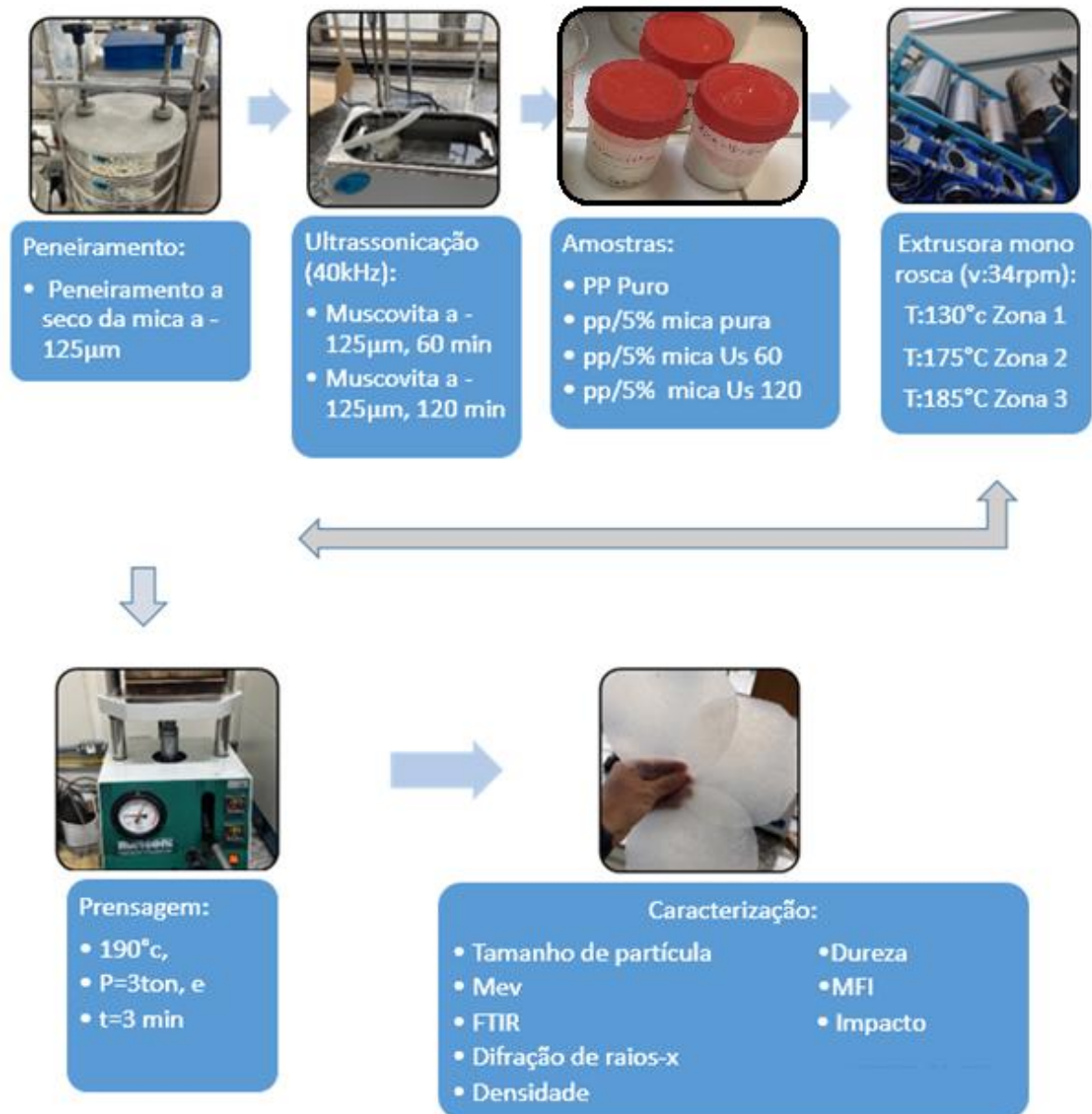
Por efeito de uma fiscalização ambiental cada vez mais eficiente e priorizada pelo poder público, bem como pela disponibilidade de tecnologias de controle e processamento e de recuperação ambiental mais adequadas às necessidades da indústria mineral, tem-se buscado mudar esta realidade. Ambas, fiscalização e tecnologia, são favorecidas pelo fato de que a mineração afeta geralmente pequenas extensões geográficas, dentro de áreas controladas pelo governo federal. Todas as áreas de concessão mineral em operação no Brasil abrangem menos de 0,15% do território nacional, localizadas de forma praticamente pontual em concessões do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e liberadas mediante aprovação de um plano de controle e recuperação dos impactos ambientais, pelos órgãos específicos de fiscalização. Outras atividades econômicas, tais como a agricultura e a implantação de infra-estrutura urbana, afetam mais fortemente a integridade dos ecossistemas, aplicando produtos químicos e erradicando espécies em escala regional, o que as torna mais agressivas e de difícil recuperação (TAGLIEBER, 2007).

Neste trabalho, a muscovita extraída por processo manual dos garimpeiros locais, além de gerar demanda significativa de mão de obra, trabalha a favor da sustentabilidade no sentido de conseguir beneficiar o mineral sem a utilização de aditivos químicos e se apresentar como uma solução para a problemática acima descrita no campo de vista técnico. A retirada de impurezas é feita mecanicamente por meio de agitação e seu beneficiamento é feito por meio de extrusão e ultrassonicação, que são métodos que não agridem o meio ambiente e que se mostram eficazes em agregar valor ao material (PHILIPP, 2005).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados para realização desta pesquisa são apresentados neste tópico. O fluxograma da Figura 14 exibe um esquema resumido das principais etapas realizadas, as quais serão detalhadas a seguir.

Figura 16– Fluxograma das etapas deste trabalho



Fonte: O autor, 2023.

### 3.1 Equipamentos

- Lavadora ultrasônica ULTRACLEAN 1600 (Laboratório de Tecnologia em Materiais – UERJ-ZO)
- Estufa de esterilização e secagem MEDCLAVE (Laboratório de Tecnologia em Materiais – UERJ-ZO)
- Peneirador BERTEL (Laboratório de Tecnologia em Materiais – UERJ-ZO)

- Extrusora monorosca TECKTRIL DCT 20-40 (Laboratório Didático de Polímeros – UERJ-ZO)
- Picotadora de Pellets SAGEC SG 35/50 (Laboratório Didático de Polímeros – UERJ-ZO)
- Estufa de esterilização e secagem MARCONI MA 033/5 (Laboratório Didático de Polímeros – UERJ-ZO)
- Prensa hidráulica a quente MARCONI MA 098/C (Laboratório Didático de Polímeros – UERJ-ZO)
- Prensa hidráulica a frio MARCONI MA 098/A (Laboratório Didático de Polímeros – UERJ-ZO)
- Balança de precisão MARTE AY220 (Laboratório Didático de Polímeros – UERJ-ZO)
- Microscópio Eletrônico de Varredura HITACHI TM3030 Plus (CETEM – Centro de Tecnologia Mineral)
- Plastômetro Melt Flow Quik Index CEAST 7021 (Laboratório Didático de Polímeros – UERJ-ZO)
- Densímetro GEHAKA DSL910 (Laboratório Didático de Polímeros – UERJ-ZO)
- Durômetro Shore D BAREISS BS61 II (Laboratório Didático de Materiais – UERJ-ZO)
- Paquímetro Digital 300mm DIGIMESS 100178BL, (Laboratório Didático de Polímeros – UERJ-ZO)
- Difratorômetro de Raios-X Bruker-AXS D8 Advance Eco diffractometer (CETEM - Centro de Tecnologia Mineral)
- FTIR THERMO SCIENTIFIC NICOLET 6700 (Laboratório de Caracterização de Superfícies COPPE/UFRJ)
- Analisador de tamanho de partícula MALVERN MASTERSIZER 2000 (CETEM – Centro de Tecnologia Mineral)
- Espectrofotômetro na região do visível Delta Vista 450G (Laboratório de Tecnologia de Materiais – UERJ-ZO)
- Máquina de ensaio de impacto pendular Ceast model 9050 (Laboratório Didático de Polímeros – UERJ-ZO)

## **3.2 Materiais**

### **3.2.1 Polipropileno (PP)**

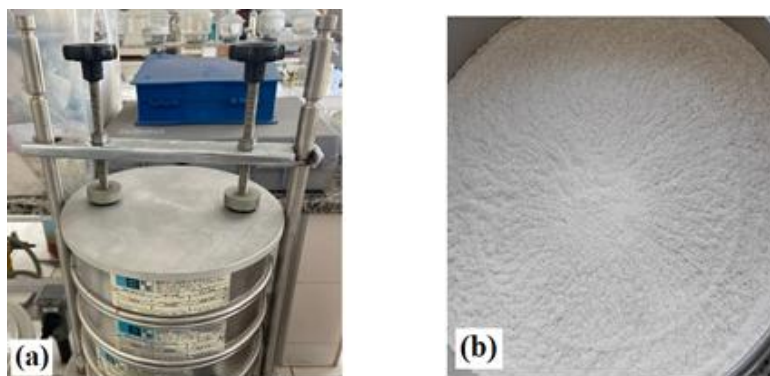
O material utilizado foi cedido pela empresa Braskem, na forma de pellets de cerca de 0,5 cm de diâmetro.

### 3.2.2 Mica Muscovita

O mineral utilizado é *in natura*, foi cedido pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), e é originário da região Borborema-Seridó (RN/PB). Esta mica foi beneficiada conforme rota desenvolvida no trabalho de CASTRO, 2014. De acordo com o referido trabalho, no processo de beneficiamento o mineral passou por homogeneização, moagem primária em moinho de facas, mesagem para retirada de impurezas, moagem secundária em moinho de facas laboratorial e peneiramento a seco (CASTRO, 2014; MONSORES, 2017).

Dentre as amostras obtidas por CASTRO *et al.*, 2014, selecionou-se o material com granulometria acima de 125 $\mu$ m, o qual foi peneirado a seco (Peneirador BERTEL) para obtenção de amostras com granulometria inferior a 125  $\mu$ m (-125  $\mu$ m), conforme mostrado na Figura 17. o trabalho de GERARDO, 2020 indicou que esta faixa granulométrica é particularmente adequada para obtenção de compósitos com matrizes poliméricas.

Figura 17—(a) Peneirador BERTEL e (b) Mica moída na granulometria de -125  $\mu$ m.



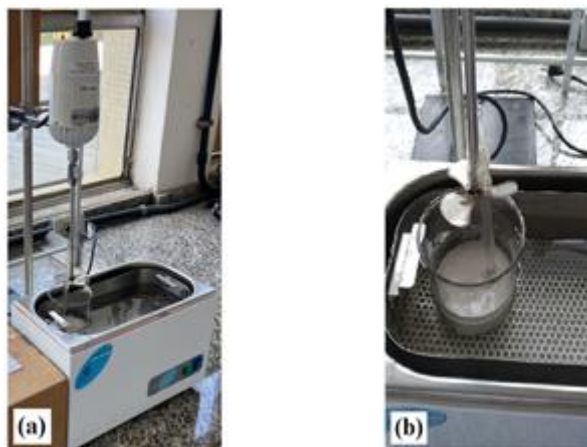
Fonte: O autor, 2023.

### 3.3 Tratamento ultrassônico da muscovita

Foram preparadas suspensões de muscovita (5g) em água destilada (100 mL) a 5% (p/v) para tratamento ultrassônico por 60 e 120 min utilizando uma lavadora ultrassônica (Ultraclean 1600) operando a 40 kHz e 500W, conforme mostrado na Figura 18(b). A temperatura do sistema, durante o tempo de tratamento, variava de 30 – 40°C. Após a

ultrassônica, as amostras foram secas em estufa (60 – 70°C) por 24h, em seguida foram desaglomeradas utilizando almofariz e pistilo.

Figura 18–(a) Exquema experimental utilizado no tratamento ultrassônico, (b) Suspensão de muscovita sendo ultrassonicada.



Fonte: Autor, 2023.

### 3.4 Preparo dos Compósitos

Para obtenção dos compósitos foram utilizados o polipropileno (PP) e mica muscovita com granulometria inferior a 125µm com (Mica125US60 e Mica125US120) e sem tratamento ultrassônico (Mica125). A proporção de mica muscovita foi mantida constante a 15%, conforme resultados observados no trabalho de ALMEIDA (2021), onde demonstrou-se ser essa uma proporção que melhora efetivamente as propriedades das matrizes poliméricas. A Tabela 2 exibe as 4 amostras utilizadas neste trabalho, com os nomes aplicados a elas e a proporção em porcentagem mássica (%m/m).

Tabela 2– Proporções de cada componente dos compósitos produzidos

Amostras	Porcentagem mássica (%m/m)	Massa de PP (g)	Massa de Mica (g)
PP	100	100	0
PP/Mica125	85/15	85	15

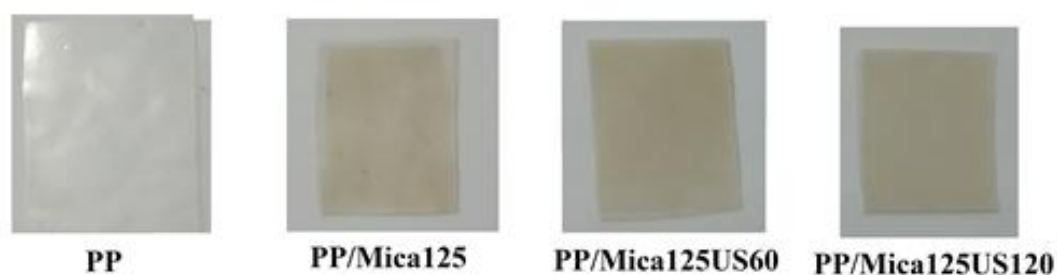
PP/Mica125US60	85/15	85	15
PP/Mica125US120	85/15	85	15

Fonte: O autor, 2023.

Sabendo-se que muscovita é um dos subtipos mais comuns do grupo de minerais micáceos, é comum que a mesma seja denominada mica (MICELI, 2015). Desta forma, neste trabalho daqui por diante utilizou-se tanto no nome das amostras quanto em algumas discussões o termo mica, por simplificação, referindo-se à muscovita.

O polipropileno e as amostras de muscovita foram previamente misturadas e introduzidas no recipiente apropriado da extrusora monorosca Tecktril. A velocidade utilizada foi de 37 rpm, passando por 03 zonas de temperatura: 140°C (zona 1), 175°C (zona 2) e 190°C (zonas 3). Ao fim da extrusão, usou-se uma tesoura para cortar os filmes e na sequência o moinho de facas para cominuir o material processado. Em seguida, as amostras foram obtidas na forma de filme planos, como mostrado na Figura 19, por prensagem a quente a 190°C e com uma pressão de 5 toneladas por 3 min.

Figura 19–Fotos das amostras obtidas após extrusão e prensagem.



Fonte: O autor, 2023.

### 3.5. Caracterização dos Materiais

#### 3.5.1 Análise de Tamanho de Partícula

A distribuição de tamanho de partícula das amostras de mica muscovita com granulometria  $-125\mu\text{m}$ , com e sem tratamento foi analisada por uma técnica de difração a laser em suspensões aquosas o equipamento Mastersizer 2000 da marca Malvern Instruments.

### 3.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As amostras de mica muscovita com granulometria  $-125\mu\text{m}$  com e sem tratamento ultrassônico e a amostras dos compósitos obtidos foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um microscópio modelo TM3030Plus Hitachi, em amostras recobertas por fina camada de ouro. No caso dos compósitos, foi analisada a superfície de fratura das amostras submetidas a ensaio de impacto.

### 3.5.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Para caracterizar a estrutura química das amostras, foram realizadas análises de FTIR (FTIR - modelo Nicolet 6700 da Thermo Scientific) no modo ATR, utilizando cristal de ZnSe, na faixa de número de ondas de  $600 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ , com 32 varreduras por análise e resolução de  $8 \text{ cm}^{-1}$ ..

### 3.5.4 Difração de raios X (DRX)

As análises de difração de raios X das amostras de muscovita, do PP e dos compósitos foram realizadas em um difratômetro Bruker-AXS D8 Advance Eco diffractometer, utilizando radiação de  $\text{Cu } \alpha$  ( $\lambda = 1.54180 \text{ \AA}$ , 40 kV/25 mA) e ângulo  $2\theta$  angle variando de  $4^\circ$  a  $70^\circ$ .

### 3.5.5 Ensaio de Densidade

A presente análise foi realizada com o densímetro digital Gehaka DSL 910, segundo norma ASTM D792 (2020). Para realização dos testes, os filmes foram recortados em corpos



de prova na medida de 1cm<sup>2</sup>, analisaram-se 20 espécimes, sendo 5 para cada amostra. Após obtidas as densidades, as médias e desvios padrão foram calculados.

### 3.5.6 Ensaio de Dureza

O ensaio de Dureza foi realizado com o equipamento Durômetro Shore D Bareiss BS61 II, segundo a norma ASTM D2240 (2021). O ensaio foi realizado aplicando o endentador sobre o corpo de prova (filme) durante 5s, após esse tempo o valor de dureza indicado foi registrado. O procedimento foi feito 5 vezes para cada amostra, logo após tirado a média e o desvio das mesmas.

### 3.5.7 Análise do Índice de Fluidez (MFI)

Através do plastômetro CEAST, modelo 7021 foi possível caracterizar o comportamento do fluxo das amostras termoplásticas analisadas, conforme a norma ASTM D1238 (2013). O ensaio consiste em medir a quantidade de material que flui através de um capilar com dimensão padrão a uma temperatura de 190°C sob uma carga de 2,16Kg no tempo de 10 minutos. Foram feitas 5 amostras para cada material.

### 3.5.8 Ensaio de Impacto IZOD

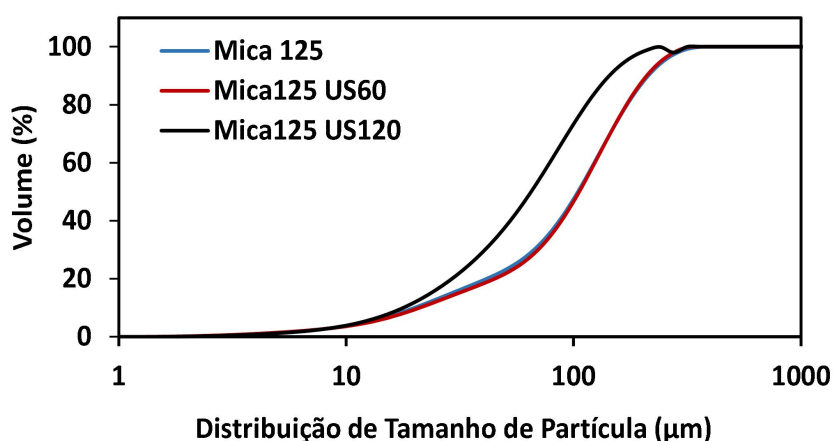
Os testes de impacto IZOD foram realizados utilizando a máquina de ensaio de impacto pendular Ceast model 9050, com martelo de impacto de capacidade 2.7J, segundo norma ASTM D256-10 (2018). Foram preparados 20 corpos de prova (5 para cada tipo de material) medindo 12 cm x 2,5 cm, com um entalhe no meio de cada amostra (para induzir a fratura neste ponto).

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Caracterização da Muscovita**

A amostra de muscovita após peneiramento a seco utilizando peneira de abertura 125 $\mu\text{m}$  (MICA125) e as amostras submetidas a tratamento ultrassônico (MICA125US60 e MICA125US120) foram analisadas quanto à distribuição de tamanho de partícula, como mostrado na Figura 20. É possível verificar um aumento do volume de partículas finas para a amostra de muscovita tratada ultrassonicamente por 120 minutos. A amostra que foi tratada por 60 minutos mostrou perfil muito próximo à da amostra que não sofreu nenhum tratamento. Esse mesmo comportamento tem sido registrado por outros pesquisadores ao utilizarem o tratamento ultrassônico em minerais (SANTOS, 2011; NOVIKOVA, 2016; BASTOS, 2023).

Figura 20—Distribuição de tamanho de partícula das amostras de muscovita antes e após ultrassonicação.



Fonte: O autor, 2023.

A análise dos valores  $D(0,1)$ ,  $D(0,5)$ ,  $D(0,9)$ , que representa os valores de tamanho de partícula abaixo do qual se situam 10, 50 e 90% das amostras respectivamente, reforça o perfil observado na Figura 18. Como pode ser visto na Tabela 3, os valores de  $D$  diminuem para amostra Mica125US120. Apesar destes resultados mostrarem uma alteração do tamanho de partícula apenas para a amostra de muscovita tratada por 120 minutos, dados da literatura e outros resultados alcançados neste trabalho mostram evidências de que com tempos menores o mineral já apresenta a ocorrência de delaminação que não necessariamente geram uma alteração significativa do tamanho do material (NOVIKOVA, 2016; BASTOS, 2023).

Tabela 3—Tamanho de partícula da muscovita antes e após tratamento ultrassônico.

Amostras	Tamanho de partícula ( $\mu\text{m}$ )		
	D (0.1)	D (0.5)	D (0.9)
Mica125	19,96	104,44	212,77
Mica125US60	21,00	105,83	209,51
Mica125US120	17,80	65,03	143,45

Fonte: O autor, 2023.

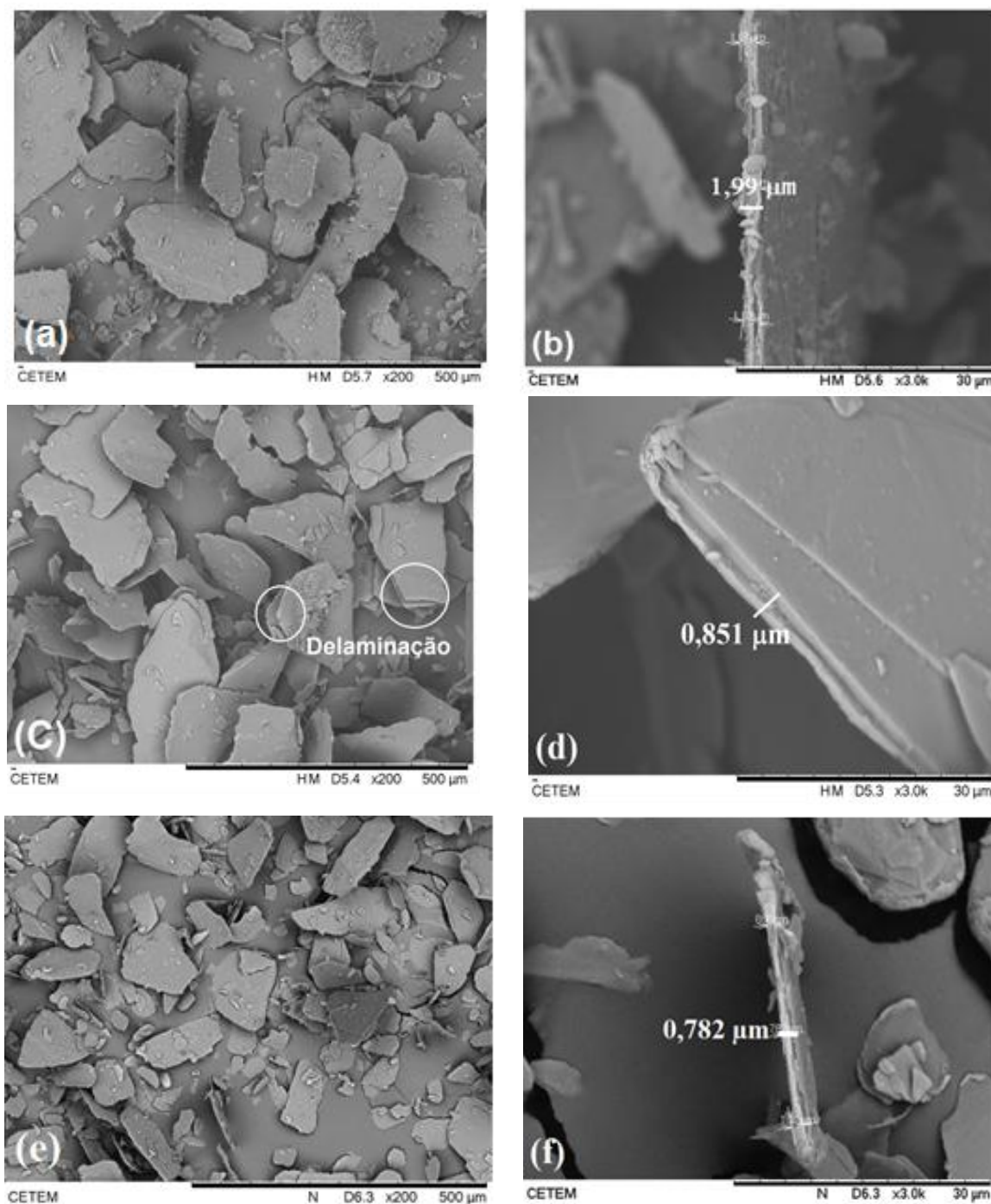
Os resultados obtidos a partir da análise de tamanho de partícula revelam ainda que as amostras apresentam tamanho de partículas variando principalmente entre 10 – 200  $\mu\text{m}$ , ou seja, incluindo partículas muito finas e partículas maiores. De acordo com LAPČÍK (2018), GERARDO(2020) e ALMEIDA (2021) uma tal distribuição de partículas, inclusive com certa proporção de partículas finas (<50  $\mu\text{m}$ ), é importante para uso em compósitos de matrizes poliméricas porque agem de forma mais eficiente no preenchimento das regiões de vazios do polipropileno.

As imagens das amostras de muscovita antes e após tratamento ultrassônico, obtidas a partir do MEV, estão exibidas na figura 21. É possível verificar a presença de diferentes tamanhos de partículas, como demonstrado pelo resultado anterior, e que todas as amostras apresentam a morfologia lamelar típica da muscovita, indicando que o tratamento por ultrassom não altera essa característica do mineral, como observado na literatura por outros pesquisadores (ALI 2014; NOVIKOVA 2016; BASTOS 2023).

Analisando as imagens das figuras 21 “(a)”, “(c)” e “(e)”, é possível verificar para amostra “(e)”, muscovita tratada por 120 minutos no ultrassom, uma diminuição do tamanho de partícula, conforme indicado também pelo resultado de distribuição de tamanho de partícula (ALI, 2014). Para a amostra tratada por 60 min, não é possível verificar essa diminuição, porém foi possível registrar uma imagem mostrando a delaminação da mica acontecendo, como mostrado na Figura 21(BASTOS, 2023).

Com objetivo de ser fazer uma avaliação qualitativa do efeito do tratamento ultrassônico sobre as amostras de muscovita, analisaram-se ainda as espessuras das três amostras conforme mostrado na figura 21 (b), (d) e (f), em que é possível verificar a diminuição da espessura com aumento do tempo de ultrassom, o que reforça o efeito de delaminação provocado pelo tratamento realizado (PARK, 2019; BASTOS, 2023).

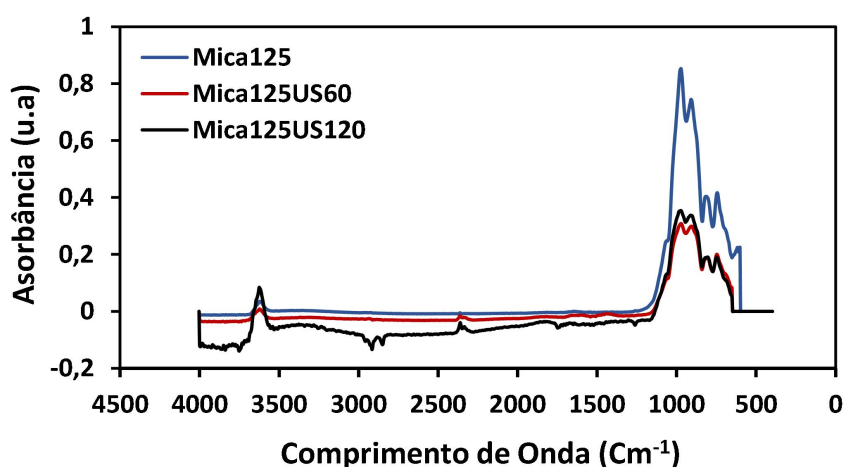
**Figura 21:** Imagens de MEV das amostras: (a) Mica125, (b) Espessura da Mica125, (c) Mica125US60, (d) Espessura da Mica125US60, (e) Mica125US120 e (f) Espessura da Mica125US120. Fonte: O autor, 2023.



Os resultados das análises de FTIR são mostrados na Figura 22. Tanto nos espectros para muscovita não tratada quanto no das duas amostras ultrassonicamente tratadas é possível verificar a presença das vibrações esperadas para o mineral. Conforme relatado por Ismail(2022), Almeida (2021)e Gerardo (2020), as bandas de absorção dos minerais do grupo

das micas surgem principalmente na região entre  $1200\text{-}700\text{cm}^{-1}$ , compreendendo vibrações do estiramento do Si-O, dos tetraedros de  $\text{Si}(\text{Al})\text{O}_4$ , dos cátions octaédricamente coordenados e dos cátions intercamadas. Na região de  $3750\text{-}3550\text{ cm}^{-1}$  surgem bandas para as vibrações de estiramento de OH de alta energia. Poderiam ser percebidas também vibrações dos cátions intercamadas, localizadas na faixa de  $400\text{-}50\text{ cm}^{-1}$ , as quais não puderam ser observadas neste resultado devido à limitação da análise.

Figura 22– FTIR das amostras de muscovita antes e após tratamento ultrassônico.



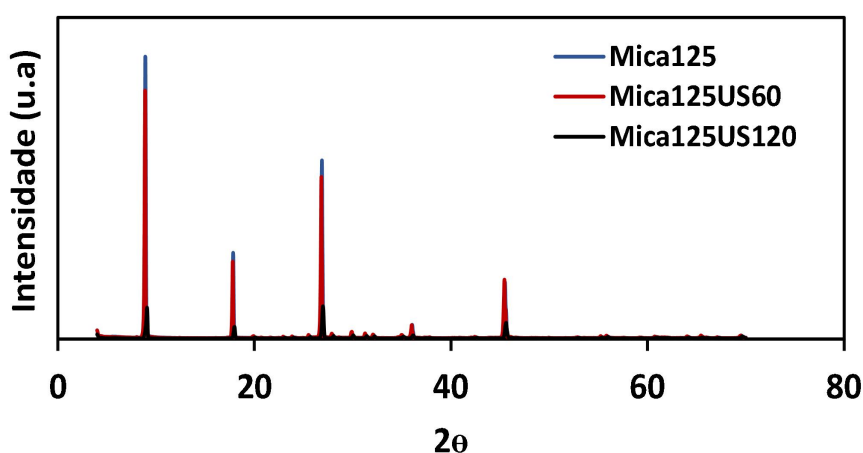
Fonte: O autor, 2023.

Particularmente para os espectros da Mica125US60 e Mica125US120, é possível observar uma diminuição na intensidade de absorção das ligações entre  $1200\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ , acredita-se que seja devido à quebra das ligações interatômicas (ou seja, Al-O, Si-O) resultante do processo de delaminação do mineral. Também é possível observar o aparecimento de bandas de absorção de baixa intensidade na região de  $2500\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ , por se tratar de um mineral de origem natural, é comum que outros minerais (quartzo, hematita, feldspatos, etc) estejam presentes na estrutura do mineral, embora este material tenha sido beneficiado e a maior parte das impurezas removida, é possível que uma pequena quantidade tenha ficado presa nas lamelas e tenham sido liberadas durante o processo de delaminação (BROWN 1995); SANTOS (2011); BASTOS, 2023).

As amostras de muscovita antes e após tratamento ultrassônico foram também caracterizadas quanto à estrutura cristalina por difração de raios X como mostrado na Figura 23. Os picos típicos da fase micácea muscovita foram observados em todas as amostras, caracterizando sua estrutura cristalina (ISMAIL, 2022).

Outros trabalhos encontrados na literatura, indicam que o tratamento ultrassônico em minerais de estrutura lamelar por curtos períodos de tempo, até 120 min, geralmente não causam alteração na estrutura cristalina dos minerais; (SANTOS, 2011; NOVIKOVA, 2016). Entretanto, é possível verificar na Figura 23 que a amostra de muscovita tratada ultrassonicamente por 120 minutos apresentou uma forte diminuição da intensidade e um ligeiro deslocamento do pico a  $9^\circ$ . A questão da intensidade na análise de raios X está muito relacionada à forma de preparo da amostra e também detalhes operacionais, porém como todas as amostras foram analisadas seguindo o mesmo método e a alteração é muito significativa, este fato pode indicar que o tratamento com ultrassom a partir de 2 horas pode estar iniciando um processo de alteração da estrutura cristalina dessa mica.

Figura 23–Difratogramas de raios X das amostras de muscovita antes e após tratamento ultrassônico.



Fonte: O autor, 2023.

#### 4.2 Caracterização dos Compósitos

Os resultados das análises de densidade, dureza Shore D, índice de fluidez (MFI) e impacto IZOD do PP e dos compósitos PP/Mica obtidos estão resumidos na Tabela 4.

A literatura registra valores de densidade do PP variando de 0,85 a 0,92 g/cm<sup>3</sup> para a resina virgem dependendo da taxa de cristalização do polímero, levando-se em conta o desvio padrão pode-se observar que o PP utilizado neste trabalho apresentou valor desta propriedade de acordo com o esperado (BARROS, 2023; DALPIAZ, 2006).

Os compósitos apresentaram uma ligeira diminuição dessa propriedade em relação ao polímero puro, o que pode ser atribuído à ocupação dos espaços livres da matriz polimérica pela carga, que é mais densa (BAGIO et al, 2022). Entretanto é possível observar um progressivo aumento da densidade para as amostras com mica tratada ultrassônicamente em relação à amostra sem tratamento, como as amostras de Mica125US60 e Mica125US120 apresentaram redução do tamanho de partícula e maior delaminação em relação à Mica125, acredita-se que além do preenchimento de vazios mais eficiente, esteja ocorrendo aumento da adesão polímero/matriz devido a presença de maior quantidade de pontos de interação polímero/mineral graças à delaminação da carga (BASTOS, 2023).

Tabela 4–Resultados das análises de densidade, dureza, MFI e impacto dos compósitos.

<b>Amostras</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Dureza (Shore D)</b>	<b>MFI (g/10min)</b>	<b>Impacto (kJ/m<sup>2</sup>)</b>
PP	0,753 ± 0,106	58,2 ± 3,7	3,694 ± 0,488	3,614 ± 0,563
PP/Mica	0,531 ± 0,059	59,6 ± 2,0	3,976 ± 0,0488	4,434 ± 2,771
PP/MicaUS60	0,566 ± 0,039	59,0 ± 3,3	6,366 ± 0,0553	3,061 ± 0,010
PP/MicaUS120	0,624 ± 0,046	59,8 ± 1,9	3,364 ± 0,0173	3,525 ± 0,779

Fonte: O autor, 2023

Os valores de MFI encontrados para o PP enquadram-se em dados da literatura que indicam que esta propriedade apresenta valores por volta de 3,0 – 4,0 g/10 min (BARROS, 2023; MONSORES 2017). Contudo, a amostra PP/Mica125US60 apresentou um valor bem maior, indicativo da diminuição da viscosidade do material no estado fundido, quando comparado às demais amostras de compósitos. GERARDO (2020) observou efeito semelhante (alto valores de MFI) para compósitos de muscovita com madeira plástica e sugeriu que esse comportamento é devido ao alinhamento das partículas lamelares da mica muscovita que ao invés de dificultar, facilita o movimento das cadeias no estado fundido. Além disto, há registros da literatura que indicam que a muscovita pode apresentar efeito lubrificante quando aquecida (PENGFEI DU, 2018). No trabalho de BASTOS, 2023 também pode ser observado que o tratamento ultrassônico da mica muscovita por 60 minutos foi o que promoveu uma distribuição da carga mais homogênea e maior alinhamento da mica no

compósito com madeira plástica. Acredita-se que efeitos semelhantes podem justificar o valor observado para a amostra deste trabalho.

Os valores de dureza Shore D das amostras também estão de acordo com dados encontrados na literatura e apresentaram diferenças pouco significativa entre as amostras. Um valor ligeiramente maior pode ser observado para amostras PP/Mica125US120 que pode estar associado a um possível aumento do números de sítios de interação polímero/matriz pela presença de partículas menores e delaminadas nessa amostra (BARROS, 2023; BASTOS, 2023; MONSORES, 2017).

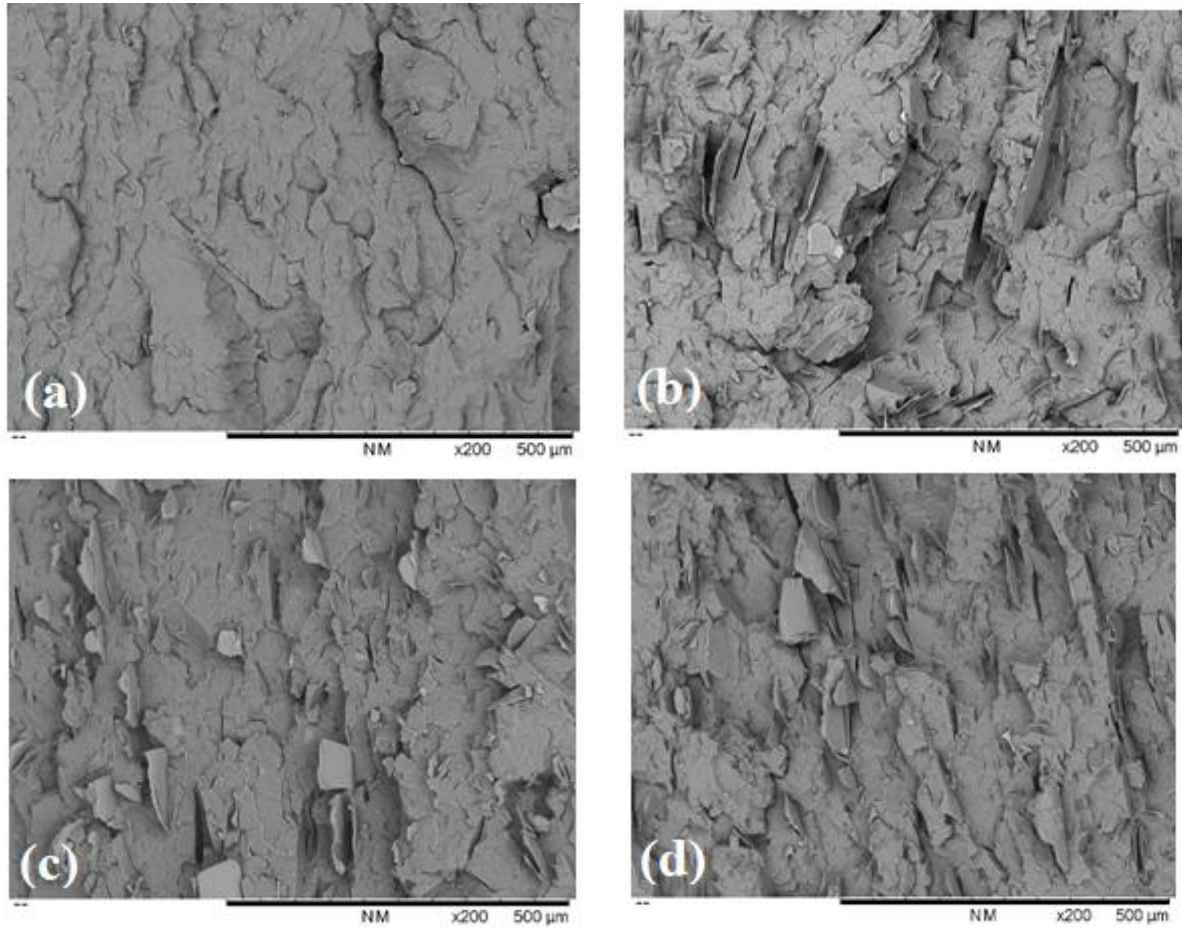
Na Tabela 4 são mostrados os resultados do ensaio de impacto. Os valores obtidos tanto para o PP puro quanto para os compósitos encontra paralelos na literatura. A resistência ao impacto está muito relacionada à cristalinidade do material, de forma que geralmente quanto maior a cristalinidade maior a rigidez e menor absorção de energia durante o impacto (LIXANDRÃO, 2019). Para as amostras de compósitos obtidas neste trabalho, observa-se um ligeiro aumento da energia de impacto com introdução da muscovita, indicando aumento da ductilidade e diminuição da propriedade com a introdução das muscovitas tratadas ultrassonicamente, indicando tendência ao enrijecimento do material o que poderia ser explicado pelo fato dessas amostras apresentarem uma distribuição de partículas contendo mais finos, quando comparado à mica sem tratamento, os quais podem atuar como grãos nucleantes da cristalização do polímero. Além disso, a própria delaminação favorece a ocorrência de mais pontos de interação polímero/carga que pode estar contribuindo para aumento da ação reforçante da carga tratada por ultrassom, conforme sugerido também pelo resultado de densidade (BARROS, 2023; BASTOS, 2023; MONSORES 2017).

A Figura 24 exibe as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de fratura, após ensaio de impacto, do polipropileno puro e dos compósitos com mica sem tratamento e tratada ultrassonicamente.

Na Figura 24 (a) é possível visualizar o polipropileno puro. Nas Figuras 24 (b), (c) e (d) estão as imagens dos três compósitos obtidos, nas quais pode ser observado de forma inequívoca a presença da fase muscovita, com presença de significativa quantidade do mineral em todas as amostras, ou seja, não houve ejeção de grande quantidade de material após a quebra por impacto, o que indica boa adesão entre o polímero e a carga (LAPČÍK, 2018; ALMEIDA, 2021).



Figura 24– MEV das amostras: (a) PP, (b) PP/Mica125, (c) PP/Mica125US60 e (d) PP/Mica125US60.



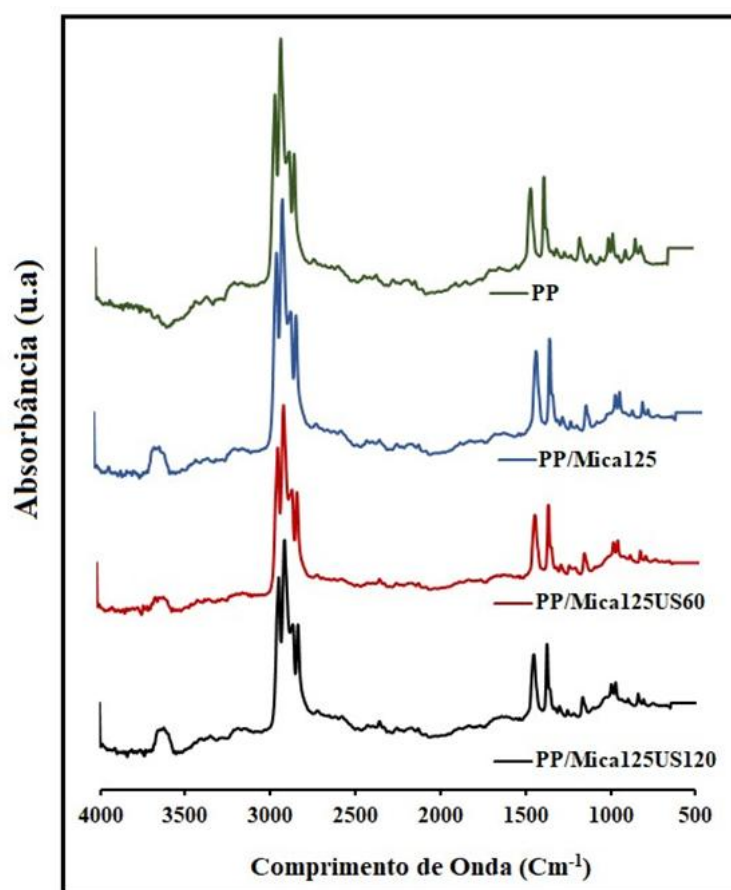
Fonte: O autor, 2023

Para as amostras com muscovita tratada ultrassonicamente é possível verificar uma melhor distribuição da carga na matriz, que exibe aparência mais homogênea, sem formação de aglomerados de mica. O mineral micáceo, assim como outros de estrutura lamelar, devido sua alta razão de aspecto tende a interagir com a matriz preferencialmente na sua superfície basal (LAPČÍK, 2018), onde existem também os cátions de compensação e hidroxilas que promovem interações com a matriz polimérica apolar, com aumento do número destas superfícies pelo tratamento de ultrassom esta orientação da matriz tornou-se mais eficiente, melhorando o alinhamento, a distribuição do material e conseqüentemente a interação polímero/carga (BASTOS, 2023). É digno de nota ainda que o aspecto da amostra PP/Mica125US60 sugere maior homogeneidade do que para amostra PP/Mica125US120, o que pode estar relacionado, como indicado pelo resultado de difração de raios X, a algum grau

de dificuldade de interação devido a um possível início de alteração da estrutura da muscovita tratada por ultrassom por 120 min (NOVIKOVA, 2016).

Os resultados de FTIR para o PP puro, os compósitos PP/Mica e PP/MicaTratada estão expostos na Figura 25. No espectro do polipropileno puro podem ser observados os picos e bandas de absorção típicos para o polímero. Os picos de absorção em 840, 1000 e 1170  $\text{cm}^{-1}$  são vibrações características de grupos  $\text{CH}_2$  insaturados presentes nos terminais do PP isotático. A banda ampla e intensa em torno de 2915  $\text{cm}^{-1}$  está relacionada as vibrações da ligação C-H e picos de vibrações de deformação do grupo metileno surgem na faixa espectral de 1445 a 1485  $\text{cm}^{-1}$ (MACHADO, 2021).

Figura 25–FTIR do PP puro e dos compósitos PP/Mica125.



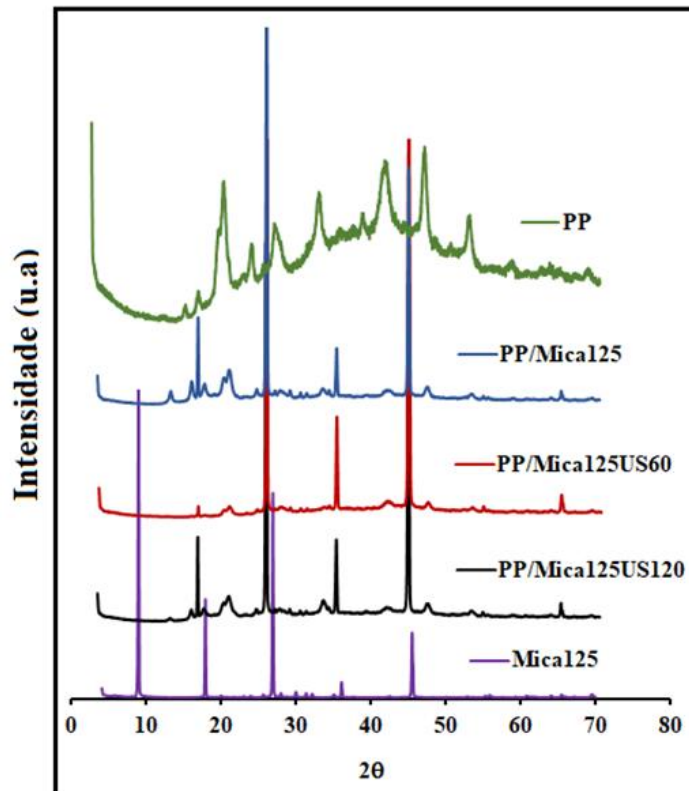
Fonte: O autor, 2023.

As amostras de compósitos exibiram perfil de absorbância muito similar à do PP puro, a presença da muscovita, no entanto, pode ser notada pelo pico de absorção na região de

3750-3550  $\text{cm}^{-1}$  que corresponde as vibrações de estiramento das hidroxilas (OH) presentes na estrutura da mica muscovita. Não foi possível observar diferenças significativas entre os perfis do PP com mica e do PP com mica tratada ultrassonicamente, de onde se pode inferir que a interação PP/Mica é de natureza física, como observado também por Gerardo, 2020 e Bastos 2023 para sistemas similares, e que a natureza da interação não foi alterada pelo tratamento realizado com a mica.

A Figura 26 apresenta os difratogramas de raios X para as amostras de PP, os compósitos PP/Mica e para facilitar a discussão dos resultados foi incluído o perfil da Mica muscovita pura. A curva para o polipropileno puro mostra perfil típico da estrutura polimórfica  $\alpha$ , que é a fase mais comum do cristalito da fase cristalina do PP (PÉREZ, 2013; LIBANO, 2012).

Figura 26– Difratogramas de raios X do PP puro e dos compósitos PP/Mica125.



Fonte: O autor, 2023.

Os difratogramas de todos os compósitos exibiram perfis muito semelhantes (Fig.23 (b), (c) e (d)), nos quais se pode perceber alguns picos do PP puro e alguns picos da fase micácea. Este resultado sugere que a mica não alterou a estrutura semicristalina original da matriz polimérica (MONSORES, 2017; DALPIAZ, 2006). Porém, é possível observar que a interação do mineral com o polímero fez com que os picos a cerca de  $28^\circ$ ,  $37^\circ$  e  $47^\circ 2\theta$  fossem favorecidos em detrimento dos demais picos da muscovita pura e promoveu ainda o aparecimento do pico a cerca de  $66^\circ 2\theta$  que também é típico da muscovita mas é difícil de ser visualizado por ser de baixa intensidade (QIU, 2014), fenômeno similar foi observado também por GERARDO, 2020 e BASTOS, 2023 para o sistema madeira plástica/muscovita e associado ao alinhamento dos grãos de muscovita dentro da estrutura do polímero.

Outro fenômeno digno de nota na Figura 26 é o deslocamento da posição dos picos a cerca de  $28^\circ$ ,  $37^\circ$  e  $47^\circ 2\theta$  nos compósitos, independente do tratamento ultrassônico da muscovita, em relação a posição desses picos no perfil da muscovita. A literatura registra fato semelhante para minerais de estrutura lamelar que sofreram processos de intercalação em sua estrutura, o que provoca um aumento da distância interplanar e conseqüentemente deslocamento do pico (LÍBANO, 2012). Nas circunstâncias deste trabalho é possível sugerir que a interação do PP com a muscovita esteja promovendo algum grau de intercalação das cadeias poliméricas entre as lamelas do mineral.

Quanto às amostras com mica tratada ultrassonicamente, uma visualização mais atenta dos perfis de DRX permitir perceber para a amostra PP/Mica125US60 uma menor intensidade dos picos do polímero, o que sugere uma maior amorfização da fase polimérica deste compósito e corrobora os resultados já apresentados.

Fazendo uma análise geral dos resultados obtidos é possível perceber que o compósito PP/Mica125US60 apresentou resultado diferenciado em quase todas as análises enquanto que a amostra PP/Mica125US120 exibiu comportamento mais próximo ou melhor do que o da amostra na qual a mica não passou por tratamento ultrassônico (PP/Mica125). A literatura sugere que tratamentos ultrassônicos prolongados de minerais lamelares podem alterar sua estrutura química e morfológica, os dados obtidos neste trabalho sugerem que o tratamento ultrassônico da muscovita por 120 minutos promoveu a obtenção da distribuição de tamanho de partícula e grau de delaminação que mais favoreceu a interação com a matriz polimérica de polipropileno.

## CONCLUSÕES

Foi possível realizar delaminação da mica do tipo muscovita, granulometria inferior a 125  $\mu\text{m}$ , por meio de tratamento ultrassônico a 40 KHz por 60 e 120 minutos.

Os resultados das análises de distribuição de tamanho de partícula revelaram a diminuição do tamanho de partícula da muscovita com aumento do tempo de tratamento ultrassônico. Este resultado foi associado também à delaminação do mineral já que as imagens de MEV permitiram observar a ocorrência da separação das lamelas das amostras de mica ultrassonicadas. Entretanto, conforme evidenciado pelos difratogramas de raios X o tratamento não alterou a estrutura cristalina da mica.

Os espectros de FTIR corroboraram a ocorrência de delaminação da muscovita pois foi possível observar a diminuição da intensidade das bandas associadas às ligações Si-Al-O nas amostras ultrassonicadas e, particularmente para a amostra PP/Mica125US120, o surgimento de bandas de baixa intensidade que foram associadas à liberação de outras fases minerais que poderiam estar presas nas lamelas do mineral.

As amostras de muscovita ultrassonicadas foram misturadas com o polímero polipropileno obtendo-se três compósitos, um com mica sem tratamento e dois com as micas ultrassonicadas com 60 e 120 minutos.

Os compósitos obtidos não exibiram aumento significativo, com relação ao polímero PP, quanto aos valores de densidade, dureza, MFI e resistência ao impacto, porém na comparação apenas entre as amostras de compósitos foi possível observar alterações.

As amostras de PP com mica apresentaram densidade menor do que a matriz polimérica, porém como este resultado não é devido à falha de interação matriz/carga pode ser também considerado um resultado satisfatório já que para muitas aplicações uma densidade mais baixa é desejável. Além disso, entre as amostras de compósitos, foi possível observar aumento da densidade com aumento do tempo de tratamento ultrassônico o que pode indicar melhoria na interação carga matriz que resultou em diminuição do volume e aumento da densidade.

Quanto ao MFI, todas as amostras apresentaram valores próximos com exceção da amostra com mica tratada com ultrassom por 60 minutos que apresentou um valor que é quase o dobro das demais e foi associado à uma facilitação da movimentação das cadeias poliméricas devido ao alinhamento das partículas de mica.

A dureza apresentou valores próximos para todas as amostras com valor ligeiramente maior para a amostra tratada com 120 minutos que pode ser associado a um aumento da cristalinidade dessa amostra. Isto foi observado também para os valores de impacto no qual as amostras com micas ultrassonicadas exibiram valores menores indicando tendência ao enrijecimento.

O MEV dos compósitos permitiu observar uma distribuição mais homogênea e maior alinhamento das micas nas amostras ultrassonicadas com poucos pontos indicativos de ejeção do mineral da matriz o que confirma os resultados observados na densidade e no MFI.

O FTIR das amostras PP/Mica mostrou perfil similar entre as amostras o que evidencia que o tratamento ultrassônico não alterou a natureza da interação polímero-mica.

O DRX exibiu comportamento que reforçou a questão do alinhamento das partículas de mica nos compósitos pois exibiu picos preferenciais e um fenômeno incomum do deslocamento dos ângulos desses mesmos picos em relação à muscovita pura o que sugere intercalação da mica pelas cadeias poliméricas.

Uma análise geral dos dados evidencia que a amostra PP/Mica125US120 foi a que alcançou melhores resultados e cabe ressaltar o mérito do trabalho no que diz respeito à sustentabilidade já que foram obtidos resultados promissores com uso de polímero *comoditie*, mineral de baixo valor agregado, resíduo da “mineração” na região nordeste do Brasil, e utilizando como tratamento da mica muscovita o tratamento ultrassônico, considerado eco-friendly, utilizando como reagente apenas água.

## REFERÊNCIAS

- AGNE, J. E. **Eletroterapia teoria e prática**. Santa Maria: Orium Editora & Comunicação Ltda, 2004.
- AGNIESZKA GABRYELCZYK, AGNIESZKA SWIDERSKA-MOCEK, DOROTA CZARNECKA-KOMOROWSKA, **Muscovite as an inert filler for highly conductive and durable gel polymer electrolyte in sodium-ion batteries**. *Journal of Power Sources* Volume 552, 30 December 2022, 232259.
- ALMEIDA, P. O. **Compósitos de Madeira Plástica reforçada com Mica Muscovita**. 2018. 77 p. Dissertação (mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia dos Materiais). Centro Universitário Estadual da Zona Oeste - UEZO, Rio de Janeiro. Orientadoras: Prof.<sup>a</sup> Dra. Daniele Cruz Bastos e Prof.<sup>a</sup> Dra Shirleny Fontes Santos.
- ALMEIDA, P.O. et al, . **Sustainable composites based on recycled high-density polyethylene/mica**. *Materials. Research*. 2021; 24(2): e20200418.
- ASTM D792: **standard test methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**: West Conshohocken, PA: ASTM; 2020.
- ASTM D2240: **standard test method for Rubber Property—Durometer Hardness**. West Conshohocken, PA: ASTM; 2021.
- ASTM D1238- 13: **standard test method for melt flow rates of thermoplastics by Extrusion plastometer**. West Conshohocken, PA: ASTM; 2013.
- ASTM D256- 10: **standart test methods for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics**. West Conshohocken, PA: ASTM; 2018.
- BAKHTIAR, N. B. A. et al. **Effect of mineral fillers on mechanical, thermal and morphological properties of kenaf recycled polyethylene wood plastic composite**. Springer Nature, 27 de setembro de 2018
- BALTAR, C. A. M.; SAMPAIO, J. A.; CALVACANTE, P. M. T. 2008. **Rochas e Minerais Industriais – Usos e Especificações**. 2 ed., cap. 29, Rio de Janeiro, RJ, Editora CETEM/MCT, 2008.
- BARROS, G.S et al, **Influência do tipo de compatibilizante nas propriedades de blendas de matrizes poliméricas recicláveis**. *Revista Contemporânea*, v. 3, n. 9, 2023.
- BASSOLI, D. A. **Avaliação dos efeitos do ultra-som pulsado de baixa intensidade na regeneração de músculos esqueléticos com vistas à aplicabilidade em clínica fisioterapêutica**. 2001. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Orientador: Prof. Dr. Affonso Luiz Ferreira.
- BASTOS, B. C. et al, **Composites based on post-industrial wood plastic waste and ultrasonic treated muscovite**, *Materials Research*, v. 26 (suppl. 1), e20220568, 2023.

BORGES, F.S. **Dermato-funcional: Modalidades terapêuticas nas disfunções estéticas**. São Paulo: Editora Phorte, 2006.

BRITO G.F. et al. **Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 6, nº 2, p. 127-139, 2011.

CALLISTER Jr., W. D.; **Materials science and engineering: an introduction**; 5th. Ed. New York: J. Wiley, 1999, c2000.

CANEVAROLO Jr, S. V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2004.

CASTANHO S. C. R.; SPERS E. E.; FARAH O. E. **Custos e benefícios para o consumidor na ação da reciclagem**. Revista de administração da Mackenzie, Volume 7, nº 4, p. 78-98, 2020.

CASTRO K.G. **Obtenção e caracterização de compósitos de mica muscovita com polipropileno**. 2014, 44 p. Monografia (Curso de graduação em tecnologia em Polímeros) Centro Universitário Estadual da Zona Oeste - UEZO, Rio de Janeiro, 2014. Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Shirleny Fontes Santos.

CAVALEIRO, J.M.H. **Fabrico e maquinação de compósitos de matriz polimérica com fibras curtas de carbono**. 2018. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. 2018. Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Bento Capela.

COSTA J.J. **O efeito abrasivo da resistência ao impacto de materiais compósitos**. 2014, 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto) Faculdade de ciências e tecnologia da Universidade de Coimbra, 2014. Orientadores: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Ana Paula Betencourt Martins Amaro e Prof. Dr. Altino de Jesus Roque Loureiro.

DALPIAZ, G. **Estudo do efeito de cargas minerais em compósitos poliméricos particulados em matriz de polipropileno**. 2006. 171 p. Tese (doutorado em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre. Orientador: Prof. Dr. Carlos Otávio Petter.

DANES, F.; GARNIER, B.; DUPUIS, T. **Predicting, Measuring, and Tailoring the Transverse Thermal Conductivity of Composites from Polymer Matrix and Metal Filler**. International Journal of Thermophysics, Vol. 24, Nº 3, P. 1-14, 2003.

FERNANDES, B. L. E., & Domingues, A. J. (2007). **Caracterização mecânica de polipropileno reciclado para a indústria automotiva**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 17(2), 85-87.

FIGUEIREDO A.L. et al. **Reciclagem Terciária do Poli(etileno tereftalato) Visando a Obtenção de Produtos Químicos e Combustível: Uma Revisão**. Revista virtual de química, v. 7, nº 4, p. 1145-1162, 2015.

FRAGASSAC., IPPOLITI M. **Technology assessment of tire mould cleaning systems and quality finishing**. International Journal for Quality Research, 10(4) 847-870. 2016



GADOTTI M. **Educar para a sustentabilidade**. Inclusão Social, Brasília, v. 3, nº 1, p. 75-78, 2008.

GERARDO, C. F. et al. “A study of recycled high-density polyethylene with mica addition: influence of mica particle size on wetting behavior, morphological, physical, and chemical properties”, **International Journal of Development Research** **10 (6)**, 37223-37228, 2020.

GERARDO C.F. **Influência da granulometria da carga em compósitos de madeira plástica/muscovita**. 2020, 66 p. Dissertação (Mestrado Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais) Centro Universitário Estadual da Zona Oeste - UEZO, Rio de Janeiro, 2014. Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Shirleny Fontes Santos.

KARINE G. et al. **Avaliação das propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos de PEAD com pó de Pinus taeda e alumina calcinada**, *Polímeros*, 25(4), 408-413, 2015.

KELLY C. DE LIRA LIXANDRÃO, FABIO F. FERREIRA, **Polypropylene and tire powder composite for use in automotive industry**. *Heliyon* 5 (2019) e02405.

LAPČÍK, L. et al. “Effect of filler particle shape on plastic-elastic mechanical behavior of high density poly(ethylene)/mica and poly(ethylene)/wollastonite composites”, **Composites Part B: Engineering** **141**, 92-99, 2018.

LENI AKCELRUD, **Fundamentos da ciência dos polímeros**. São Paulo: Editora Manole Ltda, 12 de jul. de 2007.

LUZ, A. B. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**; 2ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

LUZZI, D. **Educação Ambiental: Pedagogia, Política e Sociedade**. In: PHILIPPI, J. R. A.; PELICIONI, M. C. F. (editors). *Educação Ambiental e Sustentabilidade*, São Paulo: Manole, p. 381-400, 2005

MACEDO I.M.E. et al. **Recycling Polyethylene Terephthalate (PET) in the Fostering of Circular Economy**. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, nº 8, p. 57704-57723, 2020.

MACHADO, A.B.F. et al, **Avaliação estrutural e térmica de compósitos de polímero pós-consumo e argila nacional**, *Brazilian Journal of Development*, v.7, n.2, p.13935-13953, 2021.

MANO, E. B.; MENDES, L.C.; **Introdução a polímeros**; 2<sup>a</sup> ed. Editora Edgar Blucher LTDA. São Paulo, 1999

MICELI, R.M.P.A.; SCHNEIDER, C.L.; MICELI, R.S.D. **Aplicação da Microscopia de Força Atômica ao Estudo de Inclusões na Muscovita**, IV Jornada do Programa de Capacitação Interna – CETEM, p.1-3, 2015.

MONSORES, K.G.C. et al. “Materiais Compósitos a base de PP e muscovita”. **Revista Iberoamericana de Polímeros** **18**, n. 6, pp. 301-309, 2017

NOVIKOVA et al. L. **Effect of low frequency ultrasound on the surface properties of natural aluminosilicates**. Ultrasonics Sonochemistry. 2016; 31: 598-609.

OLIVEIRA R.V.B. et al, **Mistura Polipropileno/Poliestireno: Um Exemplo da Relação Processamento-Estrutura-Propriedade no Ensino de Polímeros**, artigo técnico científico, vol. 23, n. 1, p. 91-96, 2013

PEREIRA, J.M.C.R. **Desenvolvimento e fabrico de compósitos de matriz polimérica com fibras naturais**. 2017. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria. 2017. Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Bento Capela.

PEREIRA S.S., CURI R. C. **Meio Ambiente, Impacto Ambiental e Desenvolvimento Sustentável: Conceituações Teóricas sobre o Despertar da Consciência**. Revista Reunir, v. 2, n° 4, p. 35-57, 2012.

PHILIPPI, J.R. A.; PELICIONI, M. C. F. **Bases Políticas, Conceituais, Filosóficas e Ideológicas da Educação Ambiental, Educação Ambiental e Sustentabilidade**. Manole, p. 3-14, 2005.

PÉREZ-MAQUEDA L. A. et al. **The influence of sonication on the thermal behavior of muscovite and biotite**. Journal of the european ceramic society, 24(2004), 2793-2801, 2004

PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; LE, T.M. **A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance**. Composite Part A, volume 83, p. 98-112, 2016.

RAJAK, K.D., PAGAR, D.D., KUMAR, R., PRUNCU, C.I. **Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials**. Journal of Materials Research Technology. 2019;8(6):6354-74.

RASHID, E. S. A. et al, “**Effect of ion exchange treatment on the properties of muscovite filled epoxy composite**”, Applied Clay Science 52, 295–300, 2011.

ROMÃO, C.M.N. **Estudo do comportamento mecânico de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras naturais**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2003.

ROSA, M. L. S. (2007). **Estudo das propriedades de compósitos de polipropileno com casca de arroz** (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROSÁRIO, et al. **Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado**. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 21(2), 90-97.

SANTOS, S. F., FRANÇA, S. C. A., OGASAWARA, T. “**Method for grinding and delaminating muscovite**”, **Mining Science and Technology** 21, 7-10, 2011.

SANTOS, F.S. **Síntese de pigmentos perolizados a base de mica muscovita do seridó**. 2009. 103 p. Tese (doutorado em engenharia metalúrgica e de materiais). Universidade

Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro. Orientadora: Dr<sup>a</sup> Silvia Cristina Alves França

SPADETTIC. et al. **Propriedades térmicas e mecânicas dos compósitos de Polipropileno pós-consumo reforçados com fibras de celulose**. Revista de Polímeros, 27(número especial), 84-90, 2017

TAGLIEBER, J. E.; SILVA, A. M. **A escola como centro irradiador da Educação Ambiental**. In: GUERRA, A. F.S.; TAGLIEBER, J. E. (org.) Educação Ambiental: fundamentos, práticas e desafios. 1 ed.,Univali, p. 197- 213, 2007

TAKEI T. et al. **Composites Part B: Engineering**, Volume 44, Issue 1, January 2013, Pages 260-265, 2013.

TEIXEIRA, A. C. **Educação Ambiental: Caminho para a sustentabilidade**. Revista Brasileira de Educação Ambiental, v. 2, p. 23-31, 2007. 140. LEFF, E. Epistemologia Ambiental, São Paulo, Editora Cortez, 2001

VÄISÄNEN, T. Et al. **Utilization of agricultural and forest industry waste and residue in natural fiber-polymer composites: a review**. Waste Management, volume54, p. 62-73, 2016.

VILLANOVA J. C. O., RODRIGO L. O., ARMANFO S. C. **Aplicações Farmacêuticas de Polímeros**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 20, nº 1, p. 51-64, 2010

WRIGHT J.T.C., GIOVINAZZO R.A. **Crescimento sustentável da indústria de plásticos criando estratégias de ação**. Revista de administração Mackenzie, v. 5, nº 1, p. 145-164, 2022.

GEDEL PLÁSTICOS, 2023. Disponível em <<https://gedelplasticos.com.br/>>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

JORNAL MATÉRIA, 2023. Disponível em<  
<https://www.jornalamateria.ufscar.br/news/explicando-a-materia-polimeros-conceitos-definicoes-e-classificacao>>. Acesso em: 16 de novembro de 2023.

PLASTICOS MODERNO, 2023. Disponível em <<https://www.plastico.com.br/polimeros-modernos-respondem-a-desafios-mais-complexos>>Acesso em: 16 de novembro de 2023.

FIBRENAMICS, 2023. Disponível em <<https://www..com/intelligence/reports/materiais-compositos-o-que-sao-e-quais-as-suas-propriedades>> Acesso em: 16 de novembro de 2023.