

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

*Trabalho de Conclusão de Curso*

Ingrid Telles de Miranda

Emissão de microplásticos para a atmosfera durante a degradação  
de máscaras descartáveis

2024

São Carlos - SP

Ingrid Telles de Miranda

Emissão de microplásticos para a atmosfera durante a degradação de máscaras descartáveis

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Bacharelado em Química Tecnológica da Universidade Federal de São Carlos, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientadora: Profa. Dra. Roberta Cerasi Urban

2024

São Carlos – SP

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS****DEPARTAMENTO DE QUÍMICA - DQ/CCET**

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33518206 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 32/2024/DQ/CCET

**Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso****Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)****FOLHA DE APROVAÇÃO****INGRID TELLES DE MIRANDA****EMISSÃO DE MICROPLÁSTICOS PARA A ATMOSFERA DURANTE A DEGRADAÇÃO****Trabalho de Conclusão de Curso****Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos**

São Carlos, 09 de setembro de 2024

**ASSINATURAS E CIÊNCIAS**

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Profa Dra. Roberta Cerasi Urban
Membro da Banca 1	Dr. Henrique Finocchio
Membro da Banca 2	Msc. Gabriel Marcondes Ferraz



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Samuel Schwab, Professor(a)**, em 10/09/2024, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1576394** e o código CRC **4C107D18**.

**Referência:** Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.001933/2024-38

SEI nº 1576394

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS****DEPARTAMENTO DE QUÍMICA - DQ/CCET**

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33518206 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-ADP nº 34/2024/DQ/CCET

**Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso****Ata da Defesa Pública (GDP-TCC-ADP)**

Aos nove dias do mês de setembro de 2024, realizou-se a Defesa Pública do Trabalho de Conclusão de Curso da estudante Ingrid Telles de Miranda do Curso de Bacharelado em Química da Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos, devidamente matriculada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, perante a Banca Examinadora, composta pela professora Dra. Roberta Cerasi Urban, Dr. Henrique Finocchio e o Msc. Gabriel Marcondes Ferraz segundo o estabelecido nas Normas para apresentação de Trabalho de Conclusão do Curso.

Após a apresentação e arguições, a Banca deliberou, segundo os critérios estabelecidos nas normas supracitadas:

Nome do Docente	Função	Nota
Profa Dra. Roberta Cerasi Urban	Orientador	10,0
Dr. Henrique Finocchio	Membro da Banca 1	10,0
Msc. Gabriel Marcondes Ferraz	Membro da Banca 2	10,0

Com isso, o Trabalho foi considerado aprovado, com nota final 10,0.

São Carlos, 10 de setembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Samuel Schwab, Professor(a)**, em 10/09/2024, às 10:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1576383** e o código CRC **7ED5B56C**.

**Referência:** Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.001933/2024-38

SEI nº 1576383

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Ata, versão de 02/Agosto/2019

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho à minha mãe, Silvia, e minha avó, Antonia.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe e minha avó, Silvia e Antonia, por todos os sacrifícios e esforços que me possibilitaram o acesso à educação, oportunidades e caminhos que vocês não tiveram. Por serem exemplos de superação de obstáculos, de momentos difíceis, de força, de honestidade e de fé. Vocês são meus maiores exemplos de amor incondicional, são minha base e suporte para tudo. Vocês me deram a vida e me apresentaram o mundo. Minhas conquistas são suas. Muito obrigada por serem minha família e me amarem incondicionalmente. Espero poder retribuir tudo que fizeram por mim e para mim durante a minha vida. Eu amo vocês.

Ao Diego, pelo incentivo para me inscrever no curso e por acompanhar o meu desenvolvimento acadêmico. Muito obrigada pelo apoio, pela ajuda, pelos incentivos, por sempre me ouvir, por me mostrar que tudo ficaria bem e pelo amor. À Heloísa, Elton e Daniela, por me acolherem como família e me acompanharem durante esses anos sempre torcendo pelo meu sucesso. Sou imensamente grata por todos os momentos que passamos juntos. Vocês sempre me fizeram sentir confortável como estar em casa e não tem sentimento melhor que esse. Muito obrigada pelo companheirismo e pelo amor.

Ao Miguel, por ser você. Muito obrigada por me fazer companhia em todos os momentos, pelas comidas extraordinárias, pelo apoio, pela confiança, pela paciência, pelas risadas, pelo cuidado, pelos incentivos, pela compreensão e pelo amor.

Ao Bruno, Diogo e Tiago, pela companhia e amizade. Muito obrigada por me receberem sempre tão bem na casa de vocês, por me ouvirem, pelas risadas, pelos passeios, pelas refeições e filmes juntos e pela presença em todos os momentos.

À Sophia, Rene, Mileny e Byanca, pelas risadas e compreensão. Muito obrigada por me aceitarem do meu jeito, por fazerem com que todos os dias fossem um pouco mais leves e repleto de risadas, por me acompanharem em todas as situações possíveis e pela intensidade em viver tudo.

Aos membros da banca pela disponibilidade e oportunidade de compartilhar conhecimentos e aprendizados. Em especial, à minha orientadora, Roberta, pelo suporte técnico e emocional, pela compreensão e empatia desde o início da minha iniciação científica até a finalização do trabalho de conclusão de curso, por ser uma excelente professora e fazer com que todo o processo tenha sido mais leve e confortável, pela ótima didática e pela inspiração profissional e pessoal.

## RESUMO

As aplicações dos polímeros plásticos remodelaram o perfil de consumo e produção da sociedade atual. Neste sentido, durante a pandemia de COVID-19, ocorreu uma elevada demanda e produção de máscaras faciais descartáveis para uso diário de profissionais da saúde e da população mundial, as quais foram utilizadas como equipamento de proteção individual para reduzir a transmissão viral do SARS-CoV-2. Em conjunto com o consumo exacerbado, os descartes inadequados e a lenta decomposição desses itens constituídos por plásticos podem acarretar a liberação de uma gama de substâncias potencialmente nocivas à vida e ao meio ambiente. Dentre estes podem ser citados os microplásticos que estão sendo determinados e relatados em todos os compartimentos ambientais. Esse trabalho teve como objetivo revisar trabalhos acerca da emissão de microplásticos para a atmosfera durante a degradação de máscaras descartáveis e das consequências ambientais e ecotoxicológicas da poluição plástica por esses resíduos plásticos. Além disso, este visa avaliar as possíveis estratégias para minimização dos impactos ambientais e de consumo. Cabe destacar que a liberação de microplásticos a partir da degradação de máscaras faciais é caracterizado como um novo desafio ambiental em relação aos impactos e a saúde e bem estar dos organismos vivos expostos a essas partículas. Portanto, o descarte e manejo das máscaras descartáveis devem ser bem estruturados para conhecimento e colaboração da população mundial, visto que os impactos ocasionados pela exposição, ingestão e inalação das partículas liberadas ainda estão sendo estudados e são problemas globais. Como estratégia para mitigação da poluição plástica por máscaras faciais, podem ser citadas melhorias na gestão desse novo fluxo de resíduos plásticos, por inclusão de materiais multifuncionais na fabricação desses itens, pela conscientização do descarte e manejo mundial e pela implementação de processos de desinfecção para reutilização das máscaras sem prejuízo às propriedades originais.

**Palavras-chave:** Polímeros, Plásticos, Máscaras, COVID-19, Poluição Plástica e seus Impactos, Emissão de Microplásticos.

## ABSTRACT

The application of polymer has reshaped the consumption and production profile of today's society. In this sense, during the COVID-19, pandemic there was a high demand and production of disposable face masks for daily use by health professionals and the world's population, which were used as personal protective equipment to reduce the viral transmission of SARS-CoV-2. Together with excessive consumption, inadequate disposal and the slow degradation of these plastic items can lead to the release of a range of substances that are potentially harmful to life and the environment. Among these, microplastics can be mentioned, which are being determined and reported in all environmental compartments. The main objective of this work is to review studies on the emission of microplastics into the atmosphere during the degradation of disposable masks and the environmental and ecotoxicological consequences of plastic pollution caused by this plastic waste. Furthermore, it aims to evaluate possible strategies to minimize environmental and consumption impacts. It is worth highlighting that the release of microplastics from the degradation of face masks is characterized as a new environmental challenge in relation to the impacts and the health and well-being of living organisms exposed to these particles. Therefore, the disposal and management of disposable masks must be well structured for the knowledge and collaboration of the world population, since the impacts caused by the exposure, ingestion and inhalation of the released particles are still being studied and are global problems. As a strategy to mitigate plastic pollution from face masks, improvements in the management of this new flow of plastic waste can be mentioned, by including multifunctional materials in the manufacture of these items, by raising awareness of global disposal and management and by implementing disinfection processes for reusing masks without compromising their original properties.

**Keywords:** Polymers, Plastics, Masks, COVID-19, Plastic Pollution and its Impacts, Microplastic Emission.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Representação esquemática de unidades repetidas e estrutura de cadeia para um polímero genérico.....	16
<b>Figura 2</b> – Representação genérica da síntese de polipropileno a partir do monômero propeno.....	17
<b>Figura 3</b> – Esquema de classificação para as características de moléculas de polímeros.....	18
<b>Figura 4</b> – Precipitação atmosférica de microplásticos e chuvas diárias.....	21
<b>Figura 5</b> – Contribuição proporcional de cores e microplásticos por amostra no meio ambiental (ar).....	23
<b>Figura 6</b> – Ilustração mostrando a função de cada camada individual de uma máscara cirúrgica de três camadas.....	24
<b>Figura 7</b> – Ilustração esquemática do processo de <i>spunbond</i> e <i>melt-blown</i> .....	25
<b>Figura 8</b> – Partículas acumuladas observadas nas sete máscaras comumente usadas após diferentes tratamentos para reutilização.....	27
<b>Figura 9</b> – Espectros FTIR de máscaras com diferentes durações de intemperismo UV.....	28
<b>Figura 10</b> – Análise termogravimétrica/térmica diferencial das três camadas da máscara facial cirúrgica.....	29
<b>Figura 11</b> – Microplásticos coloridos: tipos de polímeros em diferentes cores de microplásticos identificados pelo espectro Raman.....	30

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 12** – A) Efeitos dos modos de corte na liberação de fibras microplásticas pela máscara: quantidade de fibras microplásticas liberadas sob diferentes métodos de corte e B) Quantidade total liberada de fibras microplásticas pela máscara envelhecida e original.....31
- Figura 13** – Efeitos potenciais de máscaras descartáveis em organismos aquáticos e terrestres.....34
- Figura 14** – Microplásticos no muco nasal humano. A) Imagem de microscópio mostrando os MPs detectados no muco nasal humano e B) Número de MPs detectados no muco nasal antes e depois de usar uma máscara (n = 3, média ± DP). Asteriscos indicam mudanças significativas em comparação a antes de usar uma máscara ( $p < 0.05$ ).....36
- Figura 15** – Mapeamento de superfície 3D de máscara cirúrgica, avaliação de danos de superfície para a máscara, usando perfilometria fotométrica baseada em gel. Barras de escala = 500  $\mu\text{m}$ . Análise da distribuição de fibras (fornecida com altura e distância em micrômetros), usando ImageJ.....38

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Classificação geral de fibras encontradas na atmosfera.....	22
<b>Tabela 2</b> – Número de nanoplásticos (NPs) e microplásticos (MPs) em máscaras faciais por tamanho. A contagem foi realizada por microscópio eletrônico de varredura (MEV) (média ± DP, n = 3).....	32
<b>Tabela 3</b> – Quantidade acumulada de microplásticos semelhantes a fibras observada durante a simulação de respiração de 720 horas com diferentes tipos de máscaras comumente usadas.....	33

## LISTA DE SIGLAS

- SARS-CoV-2 – Coronavírus da síndrome respiratória aguda grave 2
- COVID-19 – Doença do coronavírus
- EPIs – Equipamentos de proteção individuais
- OMS – Organização Mundial da Saúde
- PP – Polipropileno
- PA – Poliamida
- PU – Poliuretano
- PAN – Poliacrilonitrila
- PS – Poliestireno
- PE – Polietileno
- MPs – Microplásticos
- NPs – Nanoplásticos
- PMMA – Polimetacrilato de metila
- PEAD – Polietileno de alta densidade
- PEBD – Polietileno de baixa densidade
- MNPs – Microplásticos e nanoplásticos
- PC – Policarbonato
- PES – Poliéster
- FDA – *Food Drug Administration*
- UV – Ultravioleta
- SAMPs – Microplásticos atmosféricos suspensos
- MEV – Microscópio eletrônico de varredura
- $\mu$ -FTIR – Micro-espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
- UVGI – Irradiação germicida ultravioleta
- AFM – Microscópio de força atômica
- PET – Polietileno tereftalato
- $\mu$ -Raman – Microespectroscopia Raman
- TGA/DTA – Análise termogravimétrica/térmica diferencial
- MOF – Estrutura orgânica metálica porosa

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	16
3 PRESENÇA DE MICROPLÁSTICOS NA ATMOSFERA.....	16
3.1 ORIGEM, DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÕES.....	16
3.2 HISTÓRICO GERAL DOS MICROPLÁSTICOS ATMOSFÉRICOS.....	21
4 PANDEMIA DE COVID-19.....	23
5 EMISSÃO DE MICROPLÁSTICOS PELA DEGRADAÇÃO DE MÁSCARAS DESCARTÁVEIS.....	27
6 IMPACTOS DE MICROPLÁSTICOS PROVENIENTES DE MÁSCARAS DESCARTÁVEIS NO MEIO AMBIENTE.....	33
6.1 POLUIÇÃO POR MICROPLÁSTICOS PROVENIENTES DE MÁSCARAS DESCARTÁVEIS.....	33
6.2 CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS, NA SAÚDE HUMANA E ECOTOXICOLÓGICAS DA POLUIÇÃO DE MICROPLÁSTICOS PROVENIENTES DE MÁSCARAS DESCARTÁVEIS.....	34
6.3 POTENCIAIS ESTRATÉGIAS PARA MITIGAR A POLUIÇÃO POR MICROPLÁSTICOS PROVENIENTES DE MÁSCARAS DESCARTÁVEIS.....	37
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

## 1 INTRODUÇÃO

A produção e o uso generalizados de plásticos revolucionaram o mundo moderno com diversas comodidades para a sociedade. Nos últimos 50 anos, suas aplicações se tornaram cada vez mais atrativas, como a sua contribuição para melhorias na saúde em relação à segurança alimentar e aos equipamentos médicos descartáveis (ZHANG, Y. et al., 2020; PRATA, J. et al., 2020).

Com a pandemia de COVID-19, a demanda por equipamentos de proteção individuais (EPIs), principalmente máscaras constituídas por polímeros, cresceu exponencialmente. Em um contexto mundial, estimado no início da pandemia, 129 bilhões de máscaras, 65 bilhões de luvas e 1,6 milhões de óculos seriam necessários mensalmente para proteção dos profissionais da saúde e da população em geral, de acordo com a estimativa da Organização Mundial da Saúde (OMS). No Brasil, foram estimados consumos diários de mais de 30 milhões de máscaras, incluindo a cidade de São Paulo e Rio de Janeiro e considerando um uso de duas máscaras diariamente com uma aceitação de 80% da população (PRATA, J. et al., 2020; URBAN, R. et al., 2021).

Estas máscaras são produzidas principalmente a partir de polímeros como polipropileno (PP), poliamida (PA), poliuretano (PU), poliacrilonitrila (PAN), poliestireno (PS) e polietileno (PE), ou seja, são constituídas por materiais plásticos. Partindo deste conhecimento, o amplo uso somado aos descartes inadequados e a lenta degradação e decomposição das máscaras podem gerar os microplásticos (MPs), os quais são partículas plásticas com tamanho entre 5 mm e 1  $\mu$ m, e os nanoplásticos (NPs), menores que 1  $\mu$ m. Dessa forma, a origem dos MPs pode ser classificada em duas classes: primária e secundária. Caso os MPs sejam fabricados para aplicações específicas, como microesferas e pellets, essas partículas são denominadas primários. Enquanto os MPs secundários são originados a partir da degradação de macroplásticos/polímeros por processos físico-químicos, como MPs gerados pela degradação de máscaras faciais descartáveis. Cabe destacar que os principais processos de fragmentação e degradação das máscaras descartáveis ocorrem devido à biodegradação, ao intemperismo e à radiação solar (PRATA, J. et al., 2020; FADARE, O. et al., 2020; De-la-Torre, G., 2020; CHEN, G. et al., 2020; ZHANG, Y. et al., 2020).

Diversos estudos têm demonstrado a emissão de MPs e NPs a partir de máscaras descartáveis nos mais diversos compartimentos ambientais. Chen e colaboradores (2020) mostraram que a liberação de MPs em água deionizada sob agitação é significativamente maior

para máscaras usadas ( $1.246,62 \pm 403,50$  partículas pedaço<sup>-1</sup>) que para novas ( $183,00 \pm 78,42$  partículas pedaço<sup>-1</sup>). Outro exemplo foi apresentado por Saliu e colaboradores, que demonstraram a emissão de MPs em água do mar artificial a partir de máscaras degradadas artificialmente com luz ultravioleta. Estas máscaras apresentaram assinaturas morfológicas e químicas similares àquelas determinadas em máscaras cirúrgicas descartadas encontradas na costa italiana. A similaridade entre os perfis das máscaras degradadas durante o estudo e as máscaras encontradas na costa italiana é um fator importante a ser considerado pela representatividade do processo de degradação proposto pelo experimento com o processo de degradação existente no compartimento marinho (PIZARRO-ORTEGA, C. et al., 2022; TESFALDET, Y. et al., 2022; HU, T. et al., 2022; PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021; CHEN, X. et al., 2021; SALIU, F. et al., 2021).

Além da caracterização e quantificação de MPs ambientais provenientes de máscaras faciais, alguns estudos relataram a presença de outros componentes e elementos lixiviados destas máscaras, como cádmio, corantes e surfactantes. A presença dessas substâncias pode ocasionar danos ao meio ambiente e organismos vivos inseridos no compartimento ambiental em questão, como obstruções intestinais, falha reprodutiva e impactos na mobilidade dos organismos (PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021).

Apesar dos esforços reunidos para o desenvolvimento de alternativas às máscaras descartáveis já existentes e disponíveis, a contaminação ambiental por plásticos e seus impactos devido à COVID-19 é um fator indiscutível (PRATA, J. et al., 2020, UEKI, H. et al., 2020; SHEN, M. et al., 2021).

A geração de resíduos exacerbada pela produção de máscaras descartáveis no cenário pandêmico e a sua resistência à degradação são fatores preocupantes em relação aos impactos dos MPs e NPs à saúde humana e aos organismos vivos. Essas partículas são potencialmente nocivas à vida e ao ambiente e estão distribuídas em compartimentos ambientais distintos. Os seres humanos podem ser expostos aos MPs e NPs por diferentes vias, como a inalação, a ingestão de alimentos e água e o contato dérmico (PRATA, J. et al., 2020, ZHANG, Y. et al., 2020; PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021; MA, J. et al., 2021).

Visando a minimização das emissões de partículas plásticas a partir de máscaras descartáveis, imprescindíveis ao cuidado à saúde, têm sido estudados novas metodologias e materiais para a sua fabricação. Alguns exemplos são a impressão 3D de respiradores fabricados a partir de folhas de bananeira e fibras de seda e a utilização de celulose. Além disso, a avaliação da efetividade de proteção destes materiais e de seus ciclos de vida, assim como das máscaras em geral, estão sendo estudados (DENG, C. et al., 2022; DO THI, H. et al., 2021).

## 2 OBJETIVOS

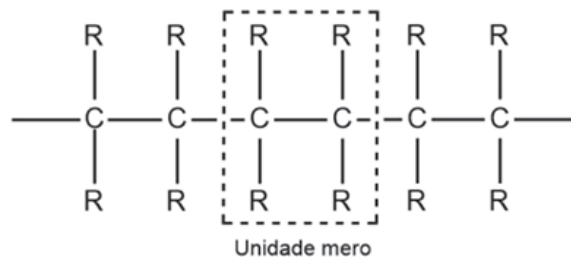
Esse trabalho tem como objetivo revisar conceitos relacionados à emissão de microplásticos para a atmosfera durante a degradação de máscaras descartáveis. Bem como, analisar os possíveis impactos e estratégias para mitigar a presença dos microplásticos no meio ambiente.

## 3 PRESENÇA DE MICROPLÁSTICOS NA ATMOSFERA

### 3.1. ORIGEM, DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÕES

Os polímeros são compostos orgânicos constituídos por carbono, hidrogênio ou elementos não metálicos. A estrutura molecular genérica destes polímeros é composta por unidades estruturais que se repetem, os meros (Figura 1). Ou seja, o esqueleto principal da cadeia polimérica é baseado em uma série de átomos de carbono ligados entre si ou envolvidos em ligações laterais com átomos ou radicais adjacentes à cadeia principal. Estes podem apresentar estruturas lineares, ramificadas, reticuladas, de rede e isoméricas, as quais são organizadas na forma de cadeias longas e flexíveis ligadas por ligações interatômicas covalentes. As propriedades poliméricas estão diretamente relacionadas às estruturas destas macromoléculas (CALLISTER, W., 2002).

**Figura 1** – Representação esquemática de unidades repetidas e estrutura de cadeia para um polímero genérico.

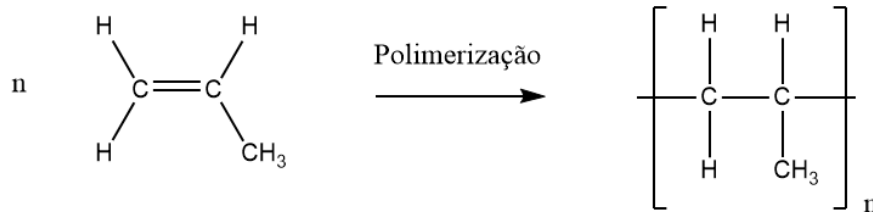


Fonte: Adaptado de CALLISTER, W., 2002.

O processo de obtenção de polímeros, conhecido como polimerização, consiste no processo químico responsável pela formação das macromoléculas através da combinação das moléculas menores, os monômeros. Os monômeros são constituídos apenas por uma unidade de mero. Um exemplo desse processo é a síntese do PP a partir da polimerização do monômero

propeno na presença de um catalisador e sob condições controladas de pressão e temperatura (Figura 2) (CALLISTER, W., 2002).

**Figura 2** – Representação genérica da síntese de polipropileno a partir do monômero propeno.

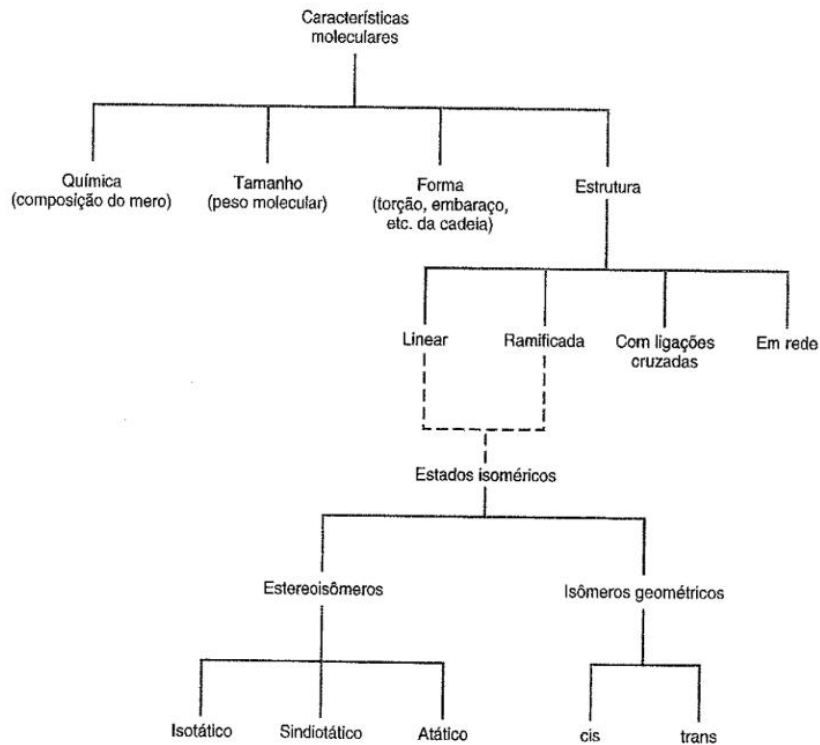


Fonte: Autoria própria.

Estruturalmente, diversos fatores são responsáveis para a determinação das características e para a caracterização dos polímeros em diferentes magnitudes como: peso molecular, forma molecular, estrutura das cadeias moleculares, configuração molecular e cristalinidade. Por exemplo, a temperatura de fusão de um polímero pode ser afetada pela presença de grupos ligados a cadeia principal, considerando a estrutura das cadeias moleculares presente, ou pelo comprimento da cadeia polimérica, considerando o peso molecular, ou pela capacidade de rotação em resposta a aplicação de tensões ou vibrações térmicas, considerando a forma molecular. Dessa maneira, é possível conhecer, caracterizar e sintetizar os polímeros desejados a partir da compreensão dos monômeros que os constituem (CALLISTER, W., 2002).

Para a classificação dos polímeros e de suas características, em geral, é possível partir da estrutura molecular do polímero ou da resposta do polímero frente a aplicação de forças mecânicas em temperaturas elevadas, a qual está relacionada a sua estrutura molecular predominante (Figura 3) (CALLISTER, W., 2002).

**Figura 3** – Esquema de classificação para as características de moléculas de polímeros.



Fonte: Adaptado de CALLISTER, W., 2002.

Mais comumente, os polímeros lineares apresentam meros unidos de ponta a ponta em cadeias únicas, longas e flexíveis por ligações covalentes, resultando em propriedades específicas, como resistência e flexibilidade. Essa classe de polímeros apresenta também interações secundárias, como forças de van der Waals e ligações de hidrogênio, como o PE e o polietileno de alta densidade (PEAD), resultando em influências nas propriedades físicas desses materiais, como temperatura de fusão e solubilidade. Enquanto os polímeros ramificados, como o polietileno de baixa densidade (PEBD), consistem em polímeros sintetizados com cadeias de ramificações laterais conectadas às principais, ocasionando a diminuição da densidade do polímero pela redução da eficiência de empacotamento da cadeia quando comparada a uma cadeia linear. Os polímeros reticulados, como as borrachas, apresentam cadeias lineares adjacentes unidas em várias posições por ligações covalentes por síntese ou reação química não reversível. Em geral, os elementos estruturais não são exclusivos e pode ser necessário determinar a estrutura molecular em termos de mais de uma classificação (CALLISTER, W., 2002).

Considerando o comportamento térmico desses materiais, os polímeros podem ser classificados também como termoplásticos, como o PE, e termofixos, como borrachas vulcanizadas. A distinção entre essas duas classes se relaciona com as suas propriedades

térmicas, como a temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão, sendo caracterizadas como a temperatura em que o polímero passa de um estado vítreo para um estado borrachoso e a temperatura em que ocorre a fusão dos cristais do polímero, respectivamente. Dessa forma, os polímeros termoplásticos apresentam temperatura de fusão e de transição vítrea definidas, enquanto os polímeros termofixos apresentam apenas a temperatura de transição vítrea definida. Sendo assim, é possível analisar que abaixo da temperatura de transição vítrea, os termoplásticos apresentam estrutura dura e frágil, enquanto acima dela, tornam-se mais maleáveis, enquanto os termofixos não são moldáveis após a cura. Ou seja, os polímeros termoplásticos são capazes de amolecer quando aquecidos e endurecem quando resfriados devido às suas estruturas químicas apresentarem apenas ligações secundárias fracas. Ou seja, são materiais que respondem a processos totalmente reversíveis pelo aumento do movimento das cadeias adjacentes ser facilitado quando um estresse é aplicado. Enquanto os polímeros termofixos não apresentam essa capacidade e são degradados de maneira irreversível quando fundidos por não apresentarem a temperatura de fusão definida como os termoplásticos. Isto é, são materiais que apresentam uma estrutura tridimensional em rede covalente entre as cadeias, sendo essas cadeias resistentes aos movimentos vibracionais e rotacionais quando expostas às altas temperaturas incapazes de serem fundidos como os termoplásticos (CALLISTER, W., 2002).

Os materiais poliméricos são capazes de sofrer degradação por interações ambientais. Esse processo é conhecido como degradação polimérica, sendo caracterizado como um processo de natureza físico-química. Os mecanismos de degradação dos polímeros não são bem compreendidos pela sua complexidade química, porém podem envolver diversos processos, como o intemperismo, a deterioração por inchamento ou por dissolução/ataque por soluções ácidas e alcalinas e a ruptura de ligações covalentes como resultado da ação da energia térmica de reações químicas e da radiação em conjunto com a sua redução da integridade mecânica. Como uma alternativa para evitar ou reduzir a taxa desses processos de degradação, é possível aumentar o peso molecular ou o grau de ligações cruzadas ou de cristalinidade do polímero em questão, assim como diminuir a temperatura a qual esse material é exposto (CALLISTER, W., 2002).

Com o aumento exponencial na quantidade de materiais poliméricos produzidos em escala global, após a Segunda Guerra Mundial, dadas as diversas aplicações industriais, houve também um aumento nos resíduos gerados por esses polímeros. Dessa forma, estes resíduos plásticos, relativamente não biodegradáveis, são considerados como um fator preocupante nos diferentes ecossistemas mundiais (CALLISTER, W., 2002).

Como são capazes de perder sua integridade mecânica por fatores ambientais, como abrasão e foto-oxidação, os resíduos poliméricos podem ser degradados e/ou fragmentados em partículas menores, os microplásticos e nanoplásticos (MNPs). Essas partículas são originadas da fragmentação de macropolímeros por diferentes tipos de processos físico-químicos (AMOBONYE, A. et al., 2021; CHEN, X. et al., 2021).

Em relação a classificação dimensional dessas partículas diminutas, os MPs abrangem as partículas poliméricas de 1 µm a 5 mm, enquanto os NPs englobam partículas menores do que 1 µm (AMOBONYE, A. et al., 2021; WANG, Z. et al., 2021; ZHANG, Y. et al., 2020). No que concerne a classificação por fontes, os MNPs podem ser divididos em duas categorias: primários e secundários. Os MNPs primários são subprodutos de emissões diretas, sendo capazes de entrar no meio ambiente em seus tamanhos originais, como àqueles utilizados em produtos de higiene e de cosméticos. Enquanto os MNPs secundários são provenientes da degradação dos resíduos plásticos/macropolásticos pela exposição à fatores físicos e químicos, como fibras de têxteis sintéticos (AMOBONYE, A. et al., 2021; CHEN, X. et al., 2021; ZHANG, Y. et al., 2020; DRIS et al., 2015).

Os MPs, em sua maioria decompostos a partir de grandes resíduos plásticos, são reconhecidos globalmente como poluentes emergentes com impactos adversos. Conseqüentemente, pelos potenciais riscos oferecidos à saúde dos organismos vivos, faz-se necessário o estudo e a investigação da contaminação por MNPs em todos os compartimentos ambientais. Muitos estudos têm sido efetuados nos últimos anos e já relatam a presença de MPs em ambientes marinhos, sedimentos, solo, água doce, atmosfera e outras matrizes ambientais com alto poder de acumulação e de transferência dentro da cadeia alimentar (CHEN, X. et al., 2021; AMOBONYE, A. et al., 2021; WANG, Z. et al., 2021). Além disso, os MPs já foram determinados distantes das suas regiões de origem, evidenciando o potencial transporte, por exemplo o atmosférico (ZHANG, Y. et al., 2020).

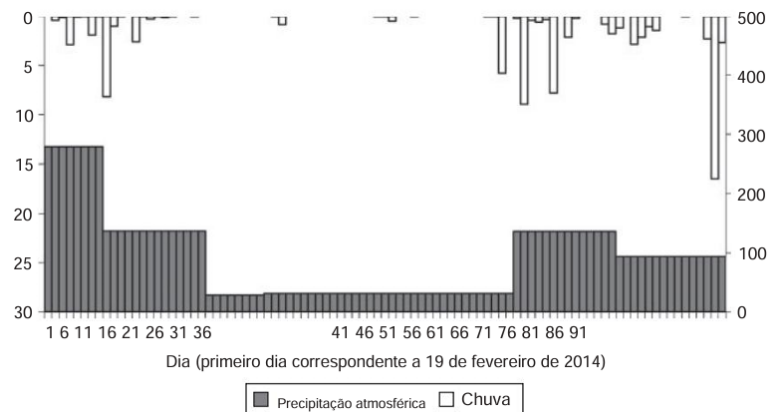
Os MPs ocorrem na atmosfera, desde áreas urbanas até remotas, em diferentes abundâncias e composições, sendo as formas e os materiais dos polímeros diretamente associados com as suas demandas mundiais. Embora estejam presentes na atmosfera, este compartimento foi o menos investigado, principalmente comparado ao ambiente aquático, todavia é necessário maior enfoque nesta área pela capacidade dos materiais suspensos no ar serem transportados regional ou globalmente. Os processos atmosféricos, como a velocidade e direção do vento, as correntes ascendentes e descendentes de ar e a sustentação por convecção, são responsáveis pela dinâmica de transporte da poluição plástica entre ambientes atmosféricos, aquáticos e terrestres (ZHANG, Y. et al., 2020; GASPERI, J. et al., 2018; SALIU, F. et al.,

2021).

### 3.2 HISTÓRICO GERAL DOS MICROPLÁSTICOS ATMOSFÉRICOS

Em um contexto histórico geral, os primeiros dados sobre a detecção e a investigação de MPs em matrizes atmosféricas urbanas, a precipitação atmosférica, foram reportados em um estudo de caso em Paris, na França, em 2015. Este artigo investigou a contaminação microplástica a fim de avaliar a concentração, o tipo e a distribuição de tamanho, considerando a faixa de 100 a 5.000  $\mu\text{m}$ . As concentrações de MPs quantificadas variaram entre 29 e 280 partículas  $\text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$  em precipitações atmosféricas tanto por meio de deposição úmida quanto seca. Além disso, foi sugerida uma possível correlação entre a precipitação úmida e a total de MPs atmosféricas comparando os períodos secos com os de maiores fluxos de precipitação (Figura 4) (DRIS, R. et al., 2015).

**Figura 4** – Precipitação atmosférica de microplásticos e chuvas diárias.



Fonte: Adaptado de DRIS, R. et al., 2015.

Outro estudo reportou a ocorrência de MPs no compartimento atmosférico, classificando as diferentes composições das fibras, assim como evidenciando o potencial de fragmentação de polímeros em fibras menores e mais biodisponíveis. Esse potencial pode ser observado em atividades cotidianas como a fabricação de roupas a partir de fibras sintéticas plásticas ou ainda durante o uso desses itens, por exemplo o uso de uma roupa de poliéster (PES) pode emitir, aproximadamente,  $1,03 \times 10^9$  microfibras por ano (NAPPER, I. Et al., 2023; GASPERI, J. et al., 2018). Cabe destacar que as fibras podem ser classificadas em naturais ou artificiais. As fibras artificiais são subdivididas em inorgânicas, como o carbono e o vidro, e orgânicas, como as fibras originadas pela transformação de produtos naturais ou de polímeros

sintéticos (Tabela 1) (GASPERI, J. et al., 2018).

**Tabela 1** – Classificação geral de fibras encontradas na atmosfera.

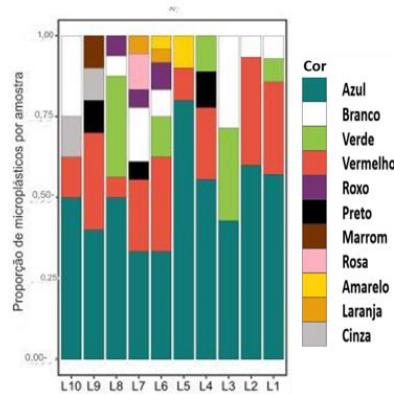
Classificação geral das fibras têxteis					
Fibras têxteis					
Fibras naturais			Fibras sintéticas		
Fibras animais	Fibras vegetais	Fibras minerais	Da química orgânica		Da química inorgânica
			Fibras artificiais	Fibras sintéticas	
Lã, seda	Algodão, juta	Amianto	Viscose/rayon, acetato, etc.	Polipropileno, acrílico, poliamida, poliéster, polietileno	Vidro, cerâmica, carbono, etc.

Fonte: Adaptado de GASPERI, J. et al., 2018.

Em Xangai, na China, um estudo investigou a fonte potencial e a distribuição espacial de microplásticos atmosféricos suspensos (SAMPs) utilizando um amostrador ativo de partículas. Os SAMPs apresentaram abundância de 0 a 4,18 itens  $m^{-3}$  de ar, sendo constituídos por 67% de microfibras, 30% de fragmentos e 3% de grânulos. Além disso, considerando estas concentrações, foi estimada a inalação externa diária por um adulto, a qual foi de 21 partículas, e o transporte anual pelo ar, o qual foi de aproximadamente, 120,7 kg de SAMPs (LI, L. et al., 2021; LIU, K. et al., 2019).

Outro estudo analisou a distribuição e caracterizou MPs no ar, águas superficiais e sedimentos dentro de um grande sistema fluvial: o Ganges. Isto porque os rios podem representar sumidouros de longo prazo dado o acúmulo de MPs nos sedimentos e a atmosfera pode ser considerada uma via de acesso de MPs transportados para este compartimento aquático. A abundância média de MPs atmosféricos depositados foi de 41,12 MP  $m^2 \text{ dia}^{-1}$ , sendo a celulose sinteticamente alterada - rayon, caracterizada como polímero dominante, com proporção estimada de 66%. Foram caracterizados também o polimetilmetacrilato (PMMA) e o PES com proporções de 17% e 10%, respectivamente. As formas, coloração e tamanho médio dos MPs também foram caracterizados, sendo determinados fibras (95%) e fragmentos (5%), azuis (48%) e vermelhos (21%) com tamanho médio de  $1.320 \pm 294 \mu m$  (Figura 5) (NAPPER, I. et al., 2023).

**Figura 5** – Contribuição proporcional de cores de microplásticos por amostra no meio ambiental (ar).



Fonte: Adaptado de NAPPER, I. et al., 2023.

Mais recentemente, vários outros estudos em diversas regiões tem investigado a presença e a origem, além do possível transporte e do risco potencial, dos MPs suspensos no ar. Dessa forma, a onipresença dos MPs no compartimento atmosférico foi demonstrada e pode ter sido agravada durante a pandemia de COVID-19 (LI, L. et al., 2021; LIU, K. et al., 2019; ZHANG, Y. et al., 2020).

#### 4 PANDEMIA DE COVID-19

Em 2019-2020, a demanda por EPIs cresceu exponencialmente devido à pandemia de COVID-19 (PRATA, J. et al., 2020). Segundo estimativa publicada em março de 2020 pela OMS, 129 bilhões de máscaras, 65 bilhões de luvas e 1,6 milhões de óculos seriam necessários mensalmente para proteção dos profissionais da saúde e da população em geral (PRATA, J. et al., 2020). Posteriormente, com a comprovação da disseminação do vírus SARS-CoV-2 via aerossóis atmosféricos, a necessidade de prevenir a transmissão viral e a sua inclusão nas legislações, a demanda por máscaras faciais realmente cresceu, enquanto as outras demandas ficaram mais restritas aos profissionais da saúde (TANG, S. et al., 2020). Um estudo realizado com mais de 1.000 pessoas de diversos países demonstrou que mais de 97% das pessoas utilizaram máscaras sempre ou frequentemente durante os anos de 2020 e 2021 (SELVARANJAN, K. et al., 2021). No Brasil, em 2020, foi estimado um consumo diário de cerca de 20 milhões de máscaras na cidade de São Paulo e cerca de 10 milhões na cidade do Rio de Janeiro, considerando um uso de duas máscaras diariamente e uma aceitação de 80% da população (URBAN, R. et al., 2021).

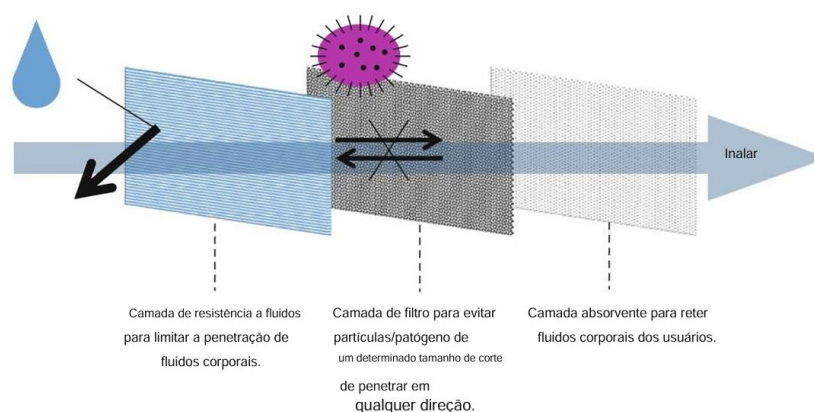
A demanda por máscaras faciais pela população mundial ocorreu e foi difundida, pois

estas atuam como barreiras físicas para contenção de doenças transmissíveis por disseminação aérea (CHUA, M. et al., 2020).

Em relação à composição de máscaras cirúrgicas, o principal material usado é o tecido fundido. Esse material é composto, principalmente, por PP, o qual apresenta alto desempenho de filtração pelo seu diâmetro de fibra reduzido, aproximadamente 1-5  $\mu\text{m}$  (LI, L. et al., 2021). O uso de PP para a fabricação de máscaras faciais descartáveis também é comum pelo preço relativamente baixo e pelo fácil processamento devido a sua baixa viscosidade do fundido. Apesar disso, as máscaras descartáveis também podem ser produzidas a partir de outros polímeros, como PU, PAN, PE, policarbonato (PC), PS ou PES (FADARE, O. et al., 2020; CHUA, M. et al., 2020; LI, L. et al., 2021).

As máscaras cirúrgicas são estruturadas em três camadas diferentes de tecido não-tecido: externa, intermediária e interna (Figura 6). A camada externa é formada por material hidrofóbico, a camada intermediária é o filtro da máscara e, por fim, a camada interna é composta por material hidrofílico. Cada camada tem uma função específica para limitar a penetração de partículas e patógenos e permitir que a proteção necessária seja atendida. Assim, a camada externa auxilia como repelente de fluidos e gotículas, a camada intermediária evita a penetração de partículas e patógenos em qualquer direção e a camada interna retém as gotículas das mucosas do indivíduo e absorve a umidade do ar exalado (CHUA, M. et al., 2020; LI, L. et al., 2021).

**Figura 6** – Ilustração mostrando a função de cada camada individual de uma máscara cirúrgica de três camadas.

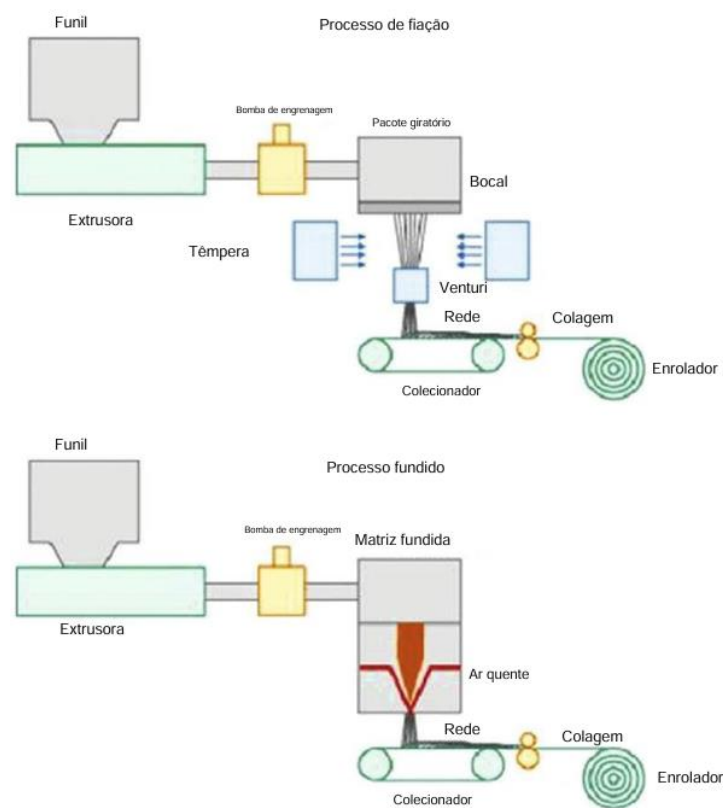


Fonte: Adaptado de CHUA et al., 2020.

O modelo comercial e estrutural do tecido não-tecido é constituído pela ligação entre camadas de uma massa de fibras formada por meios térmicos, químicos ou mecânicos. Dentre os métodos de fabricação capazes de processar uma grande variedade de termoplásticos devem

ser citados o *spunbond* e o *melt-blown* (Figura 7). O processo *spunbond* se baseia na combinação entre o processo de fiação com o de formação de folhas em um sistema de fabricação contínuo com várias etapas integradas, como extrusora, bomba de engrenagem, *spinpack* e enrolador. Embora muito semelhante ao processo anterior, o processo *melt-blown* tem como principal diferença a etapa de processamento da matriz, a qual é responsável pela fabricação de microfibras de menores diâmetros e poros. Este processo é bastante utilizado para a fabricação da camada intermediária da máscara: o filtro (CHUA, M. et al., 2020).

**Figura 7** – Ilustração esquemática do processo *spunbond* e *melt-blown*.

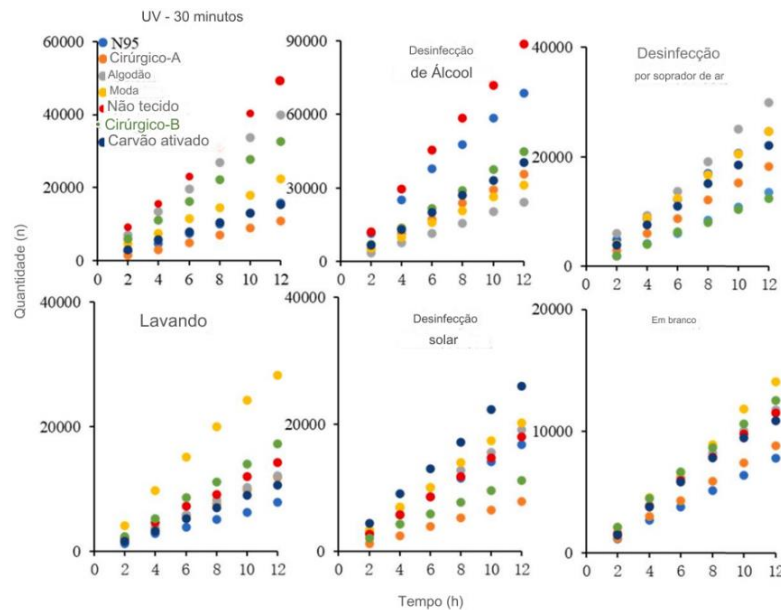


Fonte: Adaptado de CHUA et al., 2020.

Portanto, as máscaras faciais produzidas a partir de materiais poliméricos podem ser definidas como uma nova fonte emergente de fibras microplásticas no meio ambiente (FADARE, O. et al., 2020; PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021). Em ambientes abertos, estas máscaras estão suscetíveis a fragmentação por processos físico-químicos, como a radiação ultravioleta (UV), o vento e as correntes, e por processos bioquímicos, como a atividade enzimática. Alguns estudos de monitoramento nesse aspecto avaliaram os níveis de intemperismo dessas máscaras e a sua relação com a liberação de MPs para o meio ambiente (FADARE, O. et al., 2020; PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021; PRATA, J. et al., 2020). Além

disso, devido à alta demanda e escassez durante o período pandêmico, a reutilização de máscaras tornou-se uma prática cotidiana. Assim, fez-se necessário avaliar o comportamento das máscaras já utilizadas frente aos processos de desinfecção ou de reutilização direta (LI, L. et al., 2021; BENNET, D. et al., 2021). Os processos de desinfecção para a reutilização das máscaras podem ser lavagens simples ou ainda utilizarem irradiação com UV, soprador de ar, álcool e até a exposição à luz solar. Consequentemente, a interação entre esses procedimentos com a estrutura química das máscaras pode aumentar o potencial de emissão de MPs e o risco de inalação humana a estas partículas. Em vista disso, as técnicas de desinfecção mencionadas foram avaliadas e todos os processos ocasionaram danos na estrutura interna das máscaras (Figura 8). Todavia, quando comparado aos outros procedimentos, a desinfecção por radiação UV foi a que apresentou a interação estrutural consideravelmente mais fraca e pode ser o processo recomendado para a reutilização, quando necessário (LI, L. et al., 2021). Cabe destacar que a descontaminação por radiação UV, mais especificamente a irradiação germicida ultravioleta (UVGI) tem sua eficácia estruturadas em três fatores: a intensidade da radiação UV, a duração da exposição e a dimensão e direção da radiação UV em relação à máscara. Ou seja, esse processo, embora seja um método de descontaminação favorável por não utilizar substâncias tóxicas, também pode ocasionar a degradação das máscaras cirúrgicas, caso estes fatores não sejam controlados e ajustados corretamente pelos padrões de qualidade e segurança pré-estabelecidos. Um exemplo, é a liberação de MPs com a exposição prolongada à radiação UV de intensidade muito elevada. Neste caso, além da própria máscara cirúrgica se tornar uma potencial fonte de MPs ambientais, a capacidade de filtração das máscaras pode ser afetada. Em estudo realizado por Chua e colaboradores (2020), essa degradação foi observada por meio da diminuição de resistência à ruptura das tiras elásticas da máscara descartável com o aumento da dosagem de radiação UV, o que ocasionou maior liberação de MPs (CHUA, M. et al., 2020; SHEN, M. et al., 2021).

**Figura 8** – Partículas acumuladas observadas nas sete máscaras comumente usadas após diferentes tratamentos para reutilização.



Fonte: Adaptado de LI, L. et al., 2021.

Considerando o cenário pandêmico, ficou demonstrada a importância dos plásticos na rotina humana, os quais, atualmente, tornaram-se indispensáveis (CALLISTER, W., 2002; NAMAZI, H., 2017). Este cenário, também mostrou ser necessária a investigação de novos tipos de materiais, por exemplo para a produção de máscaras cirúrgicas e respiradores, visando a melhoria de qualidade e desempenho para reduzir a contaminação viral pela via respiratória e evitar as emissões de partículas MPs (CHUA, M. et al., 2020).

## 5 EMISSÃO DE MICROPLÁSTICOS PELA DEGRADAÇÃO DE MÁSCARAS DESCARTÁVEIS

Embora os padrões de qualidade para máscaras e respiradores tenham limites estabelecidos em relação à eficiência de filtração, resistência a fluidos, queda de pressão, flamabilidade e resíduos, ainda se faz necessário preencher as lacunas no que concerne a segurança da utilização de máscaras a longo prazo e das emissões de partículas (FDA, 2020; HAN, J. et al., 2021; PRATA, J. C., 2018; QU, G. et al., 2020).

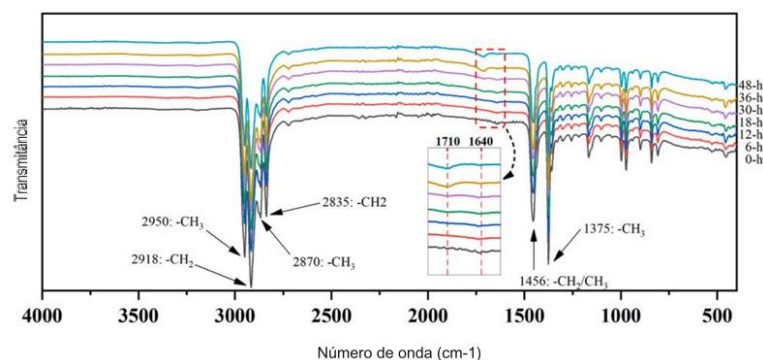
Em um contexto mais específico da liberação de MPs durante a degradação de máscaras descartáveis, um dos primeiros estudos reportou o processo de liberação de microfibras para o ambiente marinho por experimentos de intemperismo artificial, como o envelhecimento, a irradiação UV e a aplicação de estresse mecânico. Como resultados notórios, foi quantificada a

liberação de até 173 mil fibras por dia ao submeter, artificialmente, uma máscara cirúrgica a 180 horas de irradiação de luz UV e agitação vigorosa em água do mar (SALIU, F. et al., 2021).

Ainda considerando o viés de análise de características e comportamentos ambientais em ambientes marinhos, outro estudo analisou as modificações estruturais e composicionais e a resistência mecânica das máscaras descartáveis após expostas ao intemperismo UV, assim como a quantidade de MPs liberados (WANG, Z. et al., 2021). Os espectros obtidos pelas análises por micro-espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier ( $\mu$ -FTIR) indicaram que a intensidade dos picos característicos da máscara, composta majoritariamente por PP, diminuiu concomitantemente ao aumento da duração da exposição à radiação. Ou seja, a foto-oxidação ocasionou o desgaste das máscaras por reações em cadeia de radicais livres resultando em cisão ou reticulação da cadeia polimérica e quebras de ligações C-H (Figura 9) (WANG, Z. et al., 2021; ALMOND, J. et al., 2020; ANDREASSEN, E., 1999; MYLLÄRI, V. et al., 2015; ASLANZADEH, S. et al., 2010; ASLANZADEH, S. et al., 2005; CAI, L. et al., 2018).

Após a análise da composição química das máscaras, as técnicas de microscopia de força atômica (AFM) e de microscopia eletrônica de varredura (MEV) possibilitaram avaliações em relação às propriedades físico-químicas das máscaras. A abrasão física causada pela presença de areia foi considerada como um fator colaborador para o aumento da liberação de partículas microplásticas. Pontualmente, os resultados indicaram que 1,5 milhão de MPs podem ser liberados no ambiente aquoso pelo desgaste de uma máscara (WANG, Z. et al., 2021).

**Figura 9** – Espectros FTIR de máscaras com diferentes durações de intemperismo UV.



Fonte: Adaptado de WANG, Z. et al., 2021.

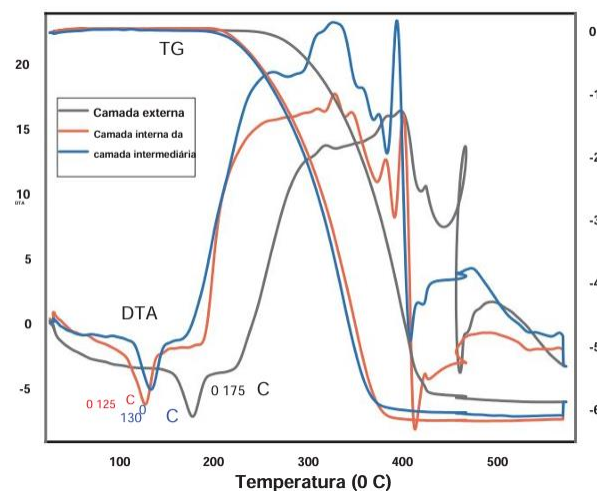
No que concerne a liberação de MPs para a atmosfera durante a degradação de máscaras descartáveis, a capacidade das máscaras faciais descartáveis novas e usadas de tornarem-se

fontes potenciais de MPs atmosféricos para o meio ambiente também foi estudada. Em um destes estudos, a identificação, a quantificação e a caracterização dos MPs liberados foram realizadas por análise de microespectroscopia Raman ( $\mu$ -Raman). Comparando a liberação em máscaras usadas e novas, houve um aumento significativo de 6 a 8,1 vezes mais partículas liberadas nas máscaras já usadas ( $183,00 \pm 78,42$  partículas por peça em máscaras novas e  $1.246,62 \pm 403,50$  partículas por peça em usadas). Essas partículas foram caracterizadas como fibras plásticas transparentes de PP de tamanho médio, majoritariamente (CHEN, X. et al., 2021).

Em geral, em relação aos estudos que reportam a liberação de MPs pela degradação de máscaras descartáveis, é possível analisar alguns fatores capazes de potencializar a liberação dessas partículas para os compartimentos ambientais em questão, como a aplicação de abrasão, o envelhecimento e a radiação UV durante o uso das máscaras (KHALED, A. et al., 2018; SONG, Y. et al., 2017; ter HALLE, A. et al., 2016; CHEN, X. et al., 2021).

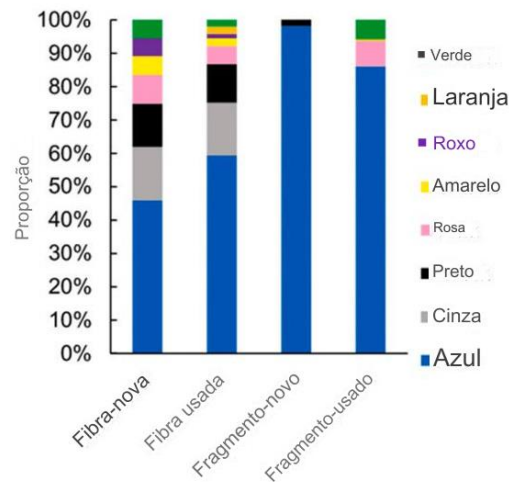
Em outro estudo, a análise termogravimétrica/térmica diferencial (TGA/DTA) foi utilizada para a identificação e rastreabilidade das fibras e fragmentos originados após a degradação (Figura 10) (ARAGAW, T.A., 2020). Em geral, as fibras e fragmentos observados foram, predominantemente, caracterizados como polietileno tereftalato (PET) e PP, e a coloração majoritária foi transparente, embora a proporção de MPs coloridos tenha aumentado após o uso das máscaras. Esse aumento foi proveniente dos MPs transportados pelo ar e adsorvidos durante a utilização das máscaras (Figura 11) (CHEN, X. et al., 2021).

**Figura 10** – Análise termogravimétrica/térmica diferencial das três camadas da máscara facial cirúrgica.



Fonte: Adaptado de ARAGAW, T.A., 2020.

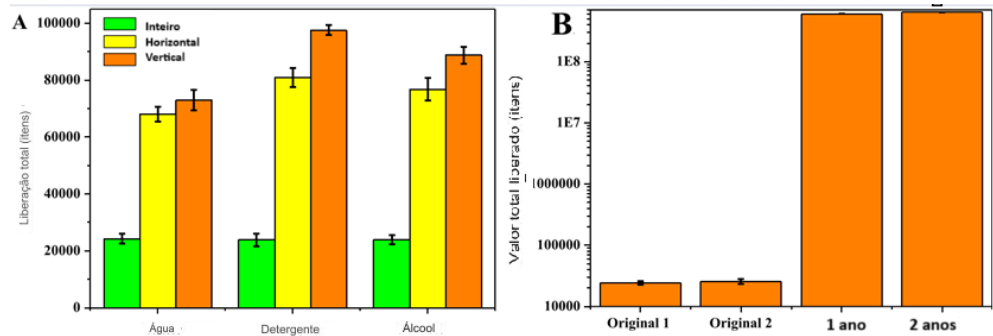
**Figura 11** – Microplásticos coloridos: tipos de polímeros em diferentes cores de microplásticos identificados pelo espectro Raman.



Fonte: Adaptado de CHEN, X. et al., 2021.

A capacidade de liberação de fibras microplásticas por fragmentação das máscaras por desgaste natural também foi estudada. Neste caso, máscaras foram expostas ao ambiente por dois meses no telhado do prédio de um laboratório da Universidade de Hunan, na China. Foi observado o aumento da liberação de MPs no meio ambiente com o aumento da área de exposição das máscaras. Assim, a exposição destas fibras nos nós da máscara foi considerado um dos fatores responsáveis pelo aumento dos fragmentos liberados (Figura 12-A). Ademais, após o envelhecimento natural, foram observadas fragilidade e irregularidade da máscara. A liberação total de fibras microplásticas aumentou  $2,5 \times 10^4$  vezes quando comparada a liberação por máscaras não envelhecidas (Figura 12-B). Por conseguinte, uma máscara descartável totalmente desgastada seria capaz de liberar vários bilhões de fibras microplásticas no ambiente por influência de fatores do próprio ambiente e, se os seus resíduos não forem geridos e tratados adequadamente, podem acarretar em impactos significativos (SHEN, M. et al., 2021).

**Figura 12** – A) Efeitos dos modos de corte na liberação de fibras microplásticas pela máscara: quantidade de fibras microplásticas liberadas sob diferentes métodos de corte e B) Quantidade total liberada de fibras microplásticas pela máscara envelhecida e original.



Fonte: Adaptado de SHEN, M. et al., 2021.

Um outro estudo reportou que as camadas intermediárias das máscaras liberaram mais partículas que as camadas externa e interna. Esse fato pode ser observado na liberação de partículas em máscaras N95 pela presença de duas camadas a mais de fibras fundidas que nas máscaras cirúrgicas comuns (Tabela 2). Uma possibilidade para ocorrer esse aumento de liberação é a diferença de rugosidade entre as camadas, a qual já foi detectada pela análise de AFM. As diferenças nos valores das rugosidades médias para a camada intermediária e para as camadas externa e interna,  $7,3 \pm 0,32$  nm,  $3,0 \pm 0,21$  nm e  $3,1 \pm 0,14$  nm, respectivamente, são devido aos diferentes processos de fabricação de fibras *spunbond* e *melt-blown*. Foi observado também o aumento em 500% do número de MPs detectados no muco nasal pela coleta de secreção nasal antes e após o uso de máscara, evidenciando que o próprio uso de máscaras pode aumentar substancialmente a inalação de MPs (MA, J. et al., 2021).

**Tabela 2** – Número de nanoplásticos (NPs) e microplásticos (MPs) em máscaras faciais por tamanho. A contagem foi realizada por microscópio eletrônico de varredura (MEV) (média  $\pm$  DP, n =3).

Lote de amostra	Tipo de máscara	País de produção	MPs $\geq 1 \mu\text{m}$ ( $10^3$ por máscara)	NPs $< 1 \mu\text{m}$ ( $10^9$ por máscara)	Diâmetro médio de NPs $< 1 \mu\text{m}$ (nm)
A	N95	USA	4,4 $\pm$ 0,1	3,3 $\pm$ 0,2	79 $\pm$ 14,1
B	N95	China	3,7 $\pm$ 0,1	3,1 $\pm$ 0,3	63 $\pm$ 10,6
C	Cirúrgica	China	1,8 $\pm$ 0,1	2,6 $\pm$ 0,3	108 $\pm$ 19,0
D	Cirúrgica	China	1,6 $\pm$ 0,3	2,1 $\pm$ 0,1	135 $\pm$ 10,3
E	Cirúrgica	China	1,5 $\pm$ 0,2	2,0 $\pm$ 0,4	144 $\pm$ 20,5
F	Cirúrgica	China	1,3 $\pm$ 0,1	1,6 $\pm$ 0,2	139 $\pm$ 16,3
G	Cirúrgica	Vietnã	1,7 $\pm$ 0,1	1,9 $\pm$ 0,4	112 $\pm$ 22,7
H	Cirúrgica	Coréia	1,7 $\pm$ 0,2	3,8 $\pm$ 0,5	103 $\pm$ 10,2
I	Cirúrgica	Japão	1,7 $\pm$ 0,2	1,9 $\pm$ 0,5	101 $\pm$ 35,7
J	Cirúrgica	Japão	2,9 $\pm$ 0,1	2,0 $\pm$ 0,1	115 $\pm$ 25,8

Fonte: Adaptado de MA, J. et al., 2021.

Analisando o risco de inalação de MPs pelo uso de máscaras, um estudo conduziu experimentos de simulação de respiração e de reaproveitamento de máscaras tratadas. O risco de inalação de MPs atmosféricos e partículas desconhecidas reduz consideravelmente pelo uso de máscaras cirúrgicas utilizadas por até 720 horas. Todavia, o uso após desinfecções, como por irradiação UV e solar, pode aumentar esse risco de inalação. Isto porque os processos de desinfecção ocasionam danos à estrutura fibrosa das máscaras e perda da função protetora, consequentemente, aumentam o risco de inalação de MPs semelhantes a fibras e substâncias exógenas (LI, L. et al., 2021; CHUA, M. et. al., 2020). De modo geral, utilizar uma máscara N95 é capaz de mitigar o risco de inalação de MPs do tipo esférico em 25,5 vezes em comparação ao não uso de máscaras, uma vez que atua como uma barreira para os MPs atmosféricos (FARIDI, S. et. al., 2020; LI, L. et al., 2021). Entretanto, ao ultrapassar o tempo de 720 horas de uso das máscaras em estudo, o risco de inalação de MPs semelhantes a fibras aumenta quando comparado ao não uso de máscaras, podendo ser originados pela própria máscara (Tabela 3) (LI, L. et al., 2021). Outros fatores devem ser considerados para uma análise crítica do impacto do uso de máscaras e sua correlação com a inalação de partículas microplásticas, como as taxas respiratórias dos humanos, a relação da taxa de penetração de partículas nas máscaras com o tempo de troca de máscaras e a resistência respiratória (GARCIA, G. et al., 2015; TIAN, L. et al., 2017; LI, L. et al., 2021).

**Tabela 3** – Quantidade acumulada de microplásticos semelhantes a fibras observada durante a simulação de respiração de 720 horas com diferentes tipos de máscaras comumente usadas.

<b>Tempos (h)</b>	<b>N95</b>	<b>Cirúrgica A</b>	<b>Algodão</b>	<b>Moda</b>	<b>Não tecido</b>	<b>Cirúrgica B</b>	<b>Carvão ativado</b>	<b>Em branco – sem máscara</b>
2	25	38	92	69	47	112	153	172
4	45	57	123	83	69	138	249	197
8	80	91	180	133	115	214	447	237
24	110	137	222	185	150	264	540	275
48	179	202	303	245	211	374	725	348
96	268	301	484	397	341	516	958	428
120	308	392	581	478	418	620	1120	482
168	366	515	741	654	540	780	1352	643
360	719	961	1337	1318	1026	1556	2086	911
720	1521	1913	2824	2576	2134	3180	3984	1835

Fonte: Adaptado de LI, L. et al, 2021.

## **6 IMPACTOS DOS MICROPLÁSTICOS PROVENIENTES DE MÁSCARAS DESCARTÁVEIS NO MEIO AMBIENTE**

### **6.1 POLUIÇÃO POR MICROPLÁSTICOS PROVENIENTES DE MÁSCARAS DESCARTÁVEIS**

Muitos estudos investigam e analisam a poluição microplástica visando compreender sua influência e relação com os mecanismos de controle de diferentes produtos plásticos. Com o surto e a disseminação da COVID-19, o uso de máscaras cirúrgicas descartáveis como EPIs eficazes e baratas foi difundido mundialmente como ferramenta para diminuição da taxa de transmissão viral entre indivíduos. Dessa maneira, o aumento exponencial na fabricação das máscaras descartáveis e seu descarte são novos desafios ambientais pela capacidade de potencializar a poluição plástica e os danos ambientais por MPs (SHEN, M. et al., 2021; FADARE, O. et al., 2020). Isto porque quando descartadas no ambiente, principalmente de forma inadequada, as máscaras cirúrgicas podem se fragmentar e serem inseridas nos diversos compartimentos ambientais. Consequentemente, pela superprodução de máscaras cirúrgicas no cenário pandêmico, é possível que o descarte seja capaz de desencadear uma nova epidemia global de MPs. Portanto, para mitigar os impactos ambientais envolvendo plásticos: macrolásticos, MPs e NPs, é necessário que a população mundial seja conscientizada tanto sobre o manejo e descarte seguro quanto sobre os impactos ambientais ocasionados pelas

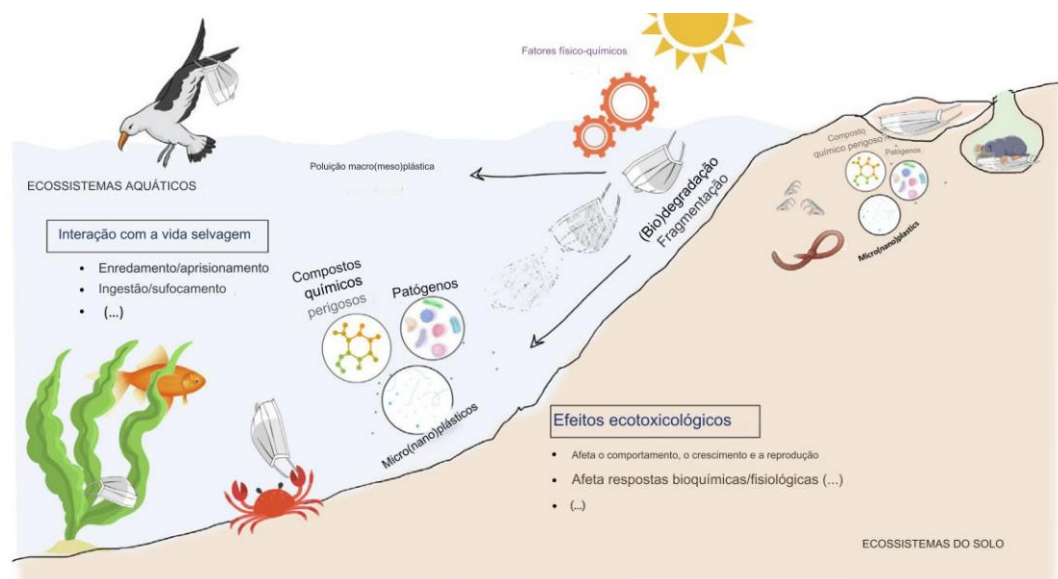
máscaras descartáveis (SHEN, M. et al., 2021; ARAGAW, T.A., 2020; WANG, Z. et al., 2021; FADARE, O. et al., 2020; REID, A. et al., 2018; DRIS et al., 2015).

## 6.2 CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS, NA SAÚDE HUMANA E ECOTOXICOLÓGICAS PELA POLUIÇÃO DE MICROPLÁSTICOS PROVENIENTES DE MÁSCARAS DESCARTÁVEIS

O aumento da produção e do consumo de máscaras faciais mundialmente e a caracterização de máscaras faciais nos ambientes terrestre, aquático e atmosférico são evidências de que a pandemia global potencializou o aumento da poluição plástica no meio ambiente, representando um risco à saúde (FADARE, O. et al., 2020; MA, J. et al., 2021).

A interação da vida selvagem com esses itens e com os contaminantes liberados, assim como o potencial para induzir efeitos ecotoxicológicos, já foram observados no ambiente marinho (PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021). Muitas máscaras cirúrgicas descartadas foram encontradas no lixo marinho e relatadas por diversas organizações ambientais, como o *Greenpeace* (SALIU, F. et al., 2021). Os efeitos potenciais adversos de máscaras descartáveis na vida selvagem aquática podem ocorrer em curto e longo prazo (Figura 13). Esses impactos são diretamente afetados pelas partículas liberadas pelas máscaras faciais e pelos produtos químicos perigosos lixiviados desses itens (PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021).

**Figura 13** – Efeitos potenciais de máscaras descartáveis em organismos aquáticos e terrestres.



Fonte: Adaptado de PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021.

Os animais podem ser expostos a poluição plástica, microplástica e nanoplástica por vias diversas, como a ingestão e o emaranhamento, independente do habitat analisado, e é prejudicial à diversos tipos de organismos. Vários efeitos negativos aos organismos vivos, como obstruções intestinais, impactos na mobilidade e menor ingestão de alimentos por falsa indicação de saciedade já foram avaliados após a ingestão de MPs (DRIS et al., 2015; PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021).

Em conjunto com a ingestão de máscaras ou partículas liberadas pelas máscaras, os organismos vivos estão suscetíveis a ingerir uma quantidade considerável de resíduos sorvidos por essas partículas poliméricas, como compostos orgânicos, metais potencialmente tóxicos e patógenos (PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021).

Em relação à composição química, as máscaras descartáveis podem conter aditivos para melhorar suas propriedades físico-químicas, como corantes, barreiras antibacterianas e o Bisfenol A utilizado como estabilizador e antioxidante na produção de polímeros. Então, é esperado que estes também sejam liberados em conjunto com a liberação de MPs (PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021).

Estudos relataram efeitos crônicos e agudos em animais pela ingestão de máscaras faciais, como a falha reprodutiva e a morte pela possível restrição da atividade alimentar necessária para a sobrevivência (PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021).

Como esses itens de proteção são majoritariamente constituídos por PP, a ingestão e os efeitos das microfibras também foram relatados em diversos organismos de ambientes aquáticos em diferentes níveis tróficos. Alguns efeitos pronunciados observados entre os organismos aquáticos nesse cenário foram a diminuição da atividade alimentar, a redução do crescimento e da massa corporal dos organismos, o aumento de deformidade e danos das espécies, a redução da reprodução e do desenvolvimento embrionário e o estresse oxidativo. De maneira geral, os efeitos adversos dos MPs estão relacionados à formação de espécies reativas de oxigênio e apresentam o estresse oxidativo como o principal evento de iniciação molecular (PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021).

Mais especificamente, um estudo notificou a presença de partículas de máscara adsorvidas na superfície de diatomáceas. Além de serem capazes de afetar a capacidade de fotossíntese dessa alga, essas partículas adsorvidas podem entrar na cadeia alimentar pelo processo de alimentação de predadores dessa espécie, como camarões. Nesse estudo também foi observada a distribuição de MPs e NPs no trato digestório e a presença dessas partículas ao redor da boca dos animais predadores dessa alga. Mesmo sendo uma evidência aos perigos de ingestão nos organismos marinhos e ao risco ecológico, ainda não é conhecido completamente

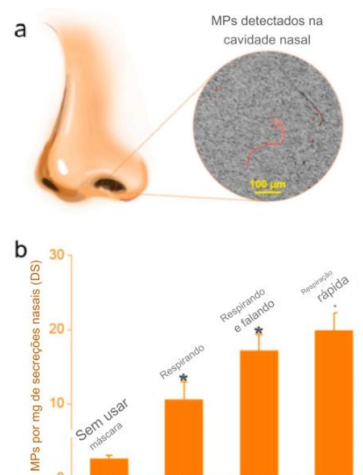
como a saúde desses animais é afetada pela presença dos MPs e NPs em seus organismos e na transferência para a cadeia alimentar marinha (MA, J. et al., 2021).

Cabe destacar que o consumo e o acúmulo de MPs nos organismos é facilitado tanto pela sua biodisponibilidade quanto pela sua translocação favorecida devido ao seu diâmetro diminuto, por exemplo como sendo capaz de translocar pelo sistema circulatório de um mexilhão. Os MPs também são biomagnificados através da cadeia alimentar (DRIS et al., 2015; BROWNE, M. et al., 2008; BAKIR, A. et al., 2014).

Pela sua persistência, os MPs e NPs podem estar presentes na ingestão humana por meio do consumo de frutos do mar e dado que ocorre a transferência e o acúmulo dessas partículas para o intestino e tecidos de mamíferos (MA, J. et al., 2021).

Os MPs provenientes de máscaras descartáveis também podem ser inalados, incluindo durante seu próprio uso. Um estudo investigou a quantidade de MPs no muco nasal após o uso de uma máscara cirúrgica. O número de MPs detectados aumentou significativamente mesmo após um curto prazo, assim como aumentou com a maior frequência respiratória testada (Figura 14). A exposição prolongada aos MPs e NPs pelo uso frequente das máscaras à base de polímeros pode causar efeitos adversos em humanos e afetar a saúde humana, como a inflamação alveolar e o estresse oxidativo. Todavia, a forma como essas partículas podem afetar a saúde humana ainda está sendo estudada (MA, J. et al., 2021).

**Figura 14** – Microplásticos no muco nasal humano. A) Imagem de microscópio mostrando os MPs detectados no muco nasal humano e B) Número de MPs detectados no muco nasal antes e depois de usar uma máscara (n = 3, média ± DP). Asteriscos indicam mudanças significativas em comparação a antes de usar uma máscara ( $p < 0.05$ )



Fonte: Adaptado de MA, J. et al., 2021.

Outra implicação do descarte incorreto das máscaras faciais é a possibilidade desses

itens atuarem como meio para novos surtos de doenças ou reinfecções de doenças pela permanência de agentes patogênicos invasivos infecciosos na sua superfície (FADARE, O. et al., 2020; REID, A. et al., 2018; CHUA, M. et al., 2020).

Todas as consequências da presença de MPs ambientais provenientes de máscaras faciais descartáveis contribuem para alterações na bioacumulação dessas partículas nos diferentes compartimentos ambientais (PATRÍCIO SILVA, A. et al., 2021).

### 6.3 POTENCIAIS ESTRATÉGIAS PARA MITIGAR A POLUIÇÃO POR MICROPLÁSTICOS PROVENIENTES DE MÁSCARAS DESCARTÁVEIS

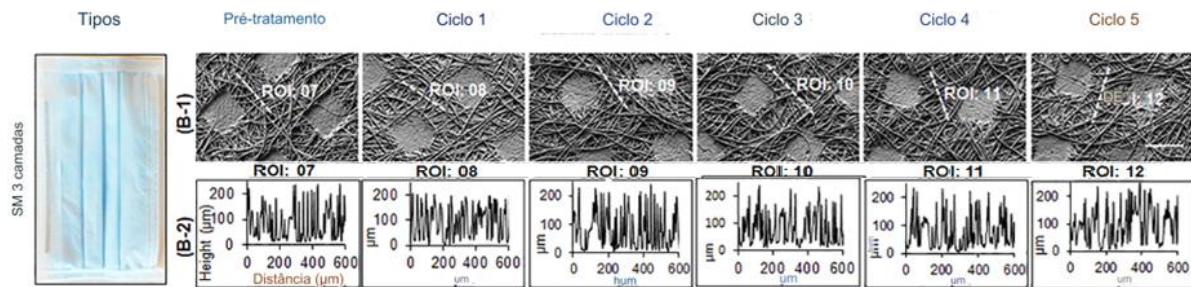
Ainda se faz necessário mais pesquisas e desenvolvimento de técnicas para a mitigação da poluição plástica oriunda de máscaras descartáveis pela sua presença recente ocasionada pelo cenário pandêmico. Os aspectos para enfoque de estratégias de atuação englobam o comportamento ambiental, o destino e a toxicidade potencial das fibras microplásticas e nanoplásticas liberadas pelas máscaras (SHEN, M. et al., 2021).

Um dos pontos de atenção em relação a atuação mais direta para evitar a contínua superprodução de máscaras descartáveis é minimizar a poluição ambiental através da reutilização de máscaras sem danificar a sua estrutura molecular por desinfecções eficientes (SHEN, M. et al., 2021; BENNET, D. et al., 2021). Além das técnicas já mencionadas, o dióxido de carbono supercrítico, CO<sub>2</sub>, pode ser utilizado como uma ferramenta de higienização e reutilização segura para máscaras descartáveis. A esterilização por CO<sub>2</sub> pode ser considerada uma tecnologia “verde” e sustentável por não gerar resíduos tóxicos, por apresentar baixo custo e sistemas de operação simples e por ser atóxico para os seres humanos e para o meio ambiente. Essa metodologia é capaz de inativar completamente os microrganismos sob condições controladas e apresenta excelente permeabilidade em uma ampla gama de materiais que podem constituir diferentes tipos de máscaras (BENNET, D. et al., 2021).

Sem induzir mudanças estruturais e de propriedades nas máscaras (Figura 15), o estudo sobre o impacto da eficácia do reprocessamento de máscaras cirúrgicas pelo uso de CO<sub>2</sub> comparou a textura da superfície e a molhabilidade da máscara antes e após ser submetida ao processo de desinfecção. Após o reprocessamento, os resultados fotométricos obtidos por topografia óptica 3D em larga escala mostraram a preservação da integridade estrutural das fibras ao longo dos ciclos aplicados. Dessa maneira, as máscaras mantiveram suas estruturas homogêneas relativamente distribuídas e sem danos superficiais observados, o que pode indicar

que são capazes de manter sua função protetora (BENNET, D. et al., 2021).

**Figura 15** – Mapeamento de superfície 3D de máscara cirúrgica, avaliação de danos de superfície para a máscara, usando perfilometria fotométrica baseada em gel. Barras de escala = 500  $\mu\text{m}$ . Análise da distribuição de fibras (fornecida com altura e distância em micrometros) para a máscara, usando ImageJ.



Fonte: Adaptado de BENNET, D. et al., 2021.

Diversos outros estudos em engenharia e desenvolvimento de materiais multifuncionais foram realizados para a elaboração de máscaras descartáveis mais modernas e eficientes, objetivando o desenvolvimento para melhorar suas propriedades, como propriedades antimicrobianas e autolimpantes, desempenho de filtragem, conforto e facilidade de utilização. Essas melhorias podem ser aplicadas em diferentes camadas da máscara cirúrgica (CHUA, M. et al., 2020).

Em relação ao desempenho do filtro de ar, é possível utilizar novos materiais de membrana com desempenho aprimorado e superfícies ativas funcionalizadas para capturar partículas por forças eletrostáticas ou interações de ligação química. Esses materiais devem abranger os fatores que influenciam as funções do filtro de ar, como o diâmetro de fibra, a espessura da membrana e a permeabilidade do ar. Alguns exemplos de materiais eficientes para serem incluídos na melhoria do filtro de ar podem ser as membranas de nanofibras de polímero, as membranas de eletreto e os filtros baseados em estrutura orgânica metálica porosa (MOF). As membranas de nanofibras de PAN possuem destaque pelo diâmetro reduzido para nanoescala permitindo que a eficiência de remoção de partículas seja melhorada pela área de superfície específica e alta porosidade, assim possibilitando que a espessura da membrana seja reduzida para garantir a baixa resistência ao ar (CHUA, M. et al., 2020).

É desejável também a inclusão de propriedades antimicrobianas nas máscaras faciais para a proteção respiratória dos indivíduos e para a purificação do ar interno durante a inalação. Para isso, uma ampla gama de agentes microbianos capazes de conferir propriedades biocidas para o filtro da máscara foram investigados, como os agente naturais, as nanopartículas de metal e com fotocatalisadores, o grafeno e seus derivados (CHUA, M. et al., 2020; CHIN, A. et al.,

2020). Considerando a alta atividade microbiana, a baixa toxicidade e o custo, os extratos antimicrobianos de produtos naturais têm sido amplamente estudados. Os flavonoides contidos nesses extratos, como azeitona e ervas, são responsáveis pelo dano e morte dos micróbios devido a sua atuação na função da membrana celular e na inibição da DNA girase. A combinação desses componentes com nanofibras poliméricas é capaz de aumentar a eficiência de filtração das máscaras cirúrgicas de maneira significativa. Todavia, são necessários mais estudos para o controle da durabilidade dos extratos em relação a processos naturais de oxidação e resistência a determinadas temperaturas. Uma alternativa para prolongar a disponibilidade desses agentes é sua combinação com substâncias antimicrobianas não naturais (CHUA, M. et al., 2020).

## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A poluição plástica: macro, micro e nanoplástica, tem sido constantemente estudada, objetivando compreender sua presença e seus impactos no meio ambiente, assim como a influência dos mecanismos de fragmentação e degradação de produtos plásticos.

A pandemia da COVID-19 evidenciou como estes estudos são relevantes, principalmente na área da saúde, dadas as demandas de produtos poliméricos. O uso de máscaras cirúrgicas descartáveis mundialmente, como EPIs para o controle da taxa de transmissão viral entre indivíduos, demonstrou como o descarte de produtos plásticos é um desafio ambiental.

Estas máscaras descartáveis podem potencializar a poluição plástica e agravar o impacto dos MPs e NPs em diversos compartimentos ambientais. Isto porque as máscaras faciais são constituídas por materiais poliméricos e podem sofrer processos de fragmentação e degradação e são capazes de liberar fibras microplásticas para o meio ambiente. A constituição química ser caracterizada como polimérica ocorre devido às características desses materiais, como possibilidade de formação de fibras, eficiência de filtração e disponibilidade e preço acessíveis.

No cenário pós-pandêmico ficou evidente como o lixo ambiental foi impactado, com a caracterização de máscaras descartáveis como um de seus componentes principais. Esses itens representam um risco à saúde humana e de outros organismos que estão em contato com esse novo resíduo plástico.

Como são constituídas por materiais poliméricos, em sua majoritariedade, o descarte e o manejo impróprios desses itens implicam diretamente na presença e persistência desse

material no meio ambiente, assim como de MPs e NPs. A presença de MPs e NPs pode ser observada em diversos níveis tróficos pela sua capacidade de transferência e deslocamento facilitada pela sua dimensão diminuta. Dessa maneira, a exposição dos seres vivos se torna cada vez mais frequente e difícil de ser monitorada, considerando as vias de ingestão por alimentação, por inalação e pelo contato dérmico.

Portanto, são necessárias estratégias para mitigar os impactos ambientais envolvendo essa poluição plástica pela sua característica de persistência e liberação de MPs e de aditivos para o meio ambiente, como reportado em diversos estudos. Possíveis soluções devem englobar o descarte e o tratamento das máscaras descartáveis com senso de responsabilidade ambiental. As estratégias devem ainda incluir alternativas ecológicas para melhorar o sistema de gestão de resíduos plásticos, a inserção de materiais multifuncionais na fabricação das máscaras descartáveis para possibilitar tanto sua reutilização quanto a menor taxa de produção desses itens e técnicas sustentáveis e aprimoradas de desinfecção para máscaras usadas a fim de evitar a contaminação do meio ambiente e a recontaminação humana.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMOND, J. et al. Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy. **e-Polymers**, 2020, 20, 369-381.

AMOBONYE, A. et al. Environmental Impacts of Microplastics and Nanoplastics: A Current Overview. **Front Microbiol**, 2021, 12, 768297.

ANDREASSEN, E. Infrared and Raman spectroscopy of polypropylene. **Polypropylene: An A-Z Reference**, 1999, 320-328.

ARAGAW, T. A. Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario. **Marine Pollution Bulletin**, 2020, 159, 111517.

ASLANZADEH, S. et al. Photodegradation of polypropylene thermal bonded non-woven fabric. **Polymer Degradation and Stability**, 2005, 90, 461-470.

ASLANZADEH, S. et al. Photo-oxidation of Polypropylene Fibers Exposed to Short

Wavelength UV Radiations. **Fibers and Polymers**, 2018, 11, 710-718.

BAKIR, A. et al. Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 2014, 140, 14-21.

BENNET, B. et al. Evaluation of supercritical CO<sub>2</sub> sterilization efficacy for sanitizing personal protective equipment from the coronavirus SARS-CoV-2. **Science of the Total Environment**, 2021, 780, 146519.

BROWNE, M. et al. Ingested Microscopic Plastic Translocates to the Circulatory System of the Mussel, *Mytilus edulis* (L.). **Environmental Science & Technology**, 2008, 42, 5026-5031.

CAI, L. et al. Observation of the degradation of three types of plastic pellets exposed to UV irradiation in three different environments. **Science of the Total Environment**, 2018, 740-747.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002.

CHEN, G. et al. Mini-review of microplastics in the atmosphere and their risks to humans. **Science of the Total Environment**, 2020, 703, 135504.

CHEN, X. et al. Used disposable face masks are significant sources of microplastics to environment. **Environmental Pollution**, 2021, 285, 117485.

CHIN, A. et al. Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. **Lancet Microbe**, 2020.

CHUA, M. et al. Face Masks in the New COVID-19 Normal: Materials, Testing and Perspectives. **Research**, 2020, 7286735, 1-40.

De-la-Torre, G. Microplastics: an emerging threat to food security and human health. **Journal of Food Science and Technology**, 2020, 57, 1601-1608.

DENG, C. et al. Antiviral/antibacterial biodegradable cellulose nonwovens as environmentally friendly and bioprotective materials with potential to minimize microplastic pollution. **Journal of Hazardous Materials**, 2022, 424, 127391.

DRIS, R. et al. Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris. **Environmental Chemistry**, 2015, 12, 592-599.

DRIS, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. **Environmental Pollution**, 2017, 221, 453-458.

DO THI, H. et al. Applicability of Membranes in Protective Face Masks and Comparison of Reusable and Disposable Face Masks with Life Cycle Assessment. **Sustainability**, 2021, 13, 12574.

FADARE, O. et al. Covid-19 face masks: A potential source of microplastic fibers in the environment. **Science of the Total Environment**, 2020, 737, 140279.

FARIDI, S. et al. Can respirator face masks in a developing country reduce exposure to ambient particulate matter? **Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology**, 2020.

FDA. **N95 Respirators, Surgical Masks, and Face Masks, 2020**. Disponível em: <<https://www.fda.gov/medical-devices/personal-protective-equipment-infection-control/n95-respirators-surgical-masks-face-masks-and-barrier-face-coverings>> Acesso em: 11 maio 2024.

GARCIA, G. et al. Olfactory deposition of inhaled nanoparticles in humans. **Inhalation Toxicology**, 2015, 27, 394-403.

GASPERI, J. et al. Microplastics in air: Are we breathing it in? **Environmental Science & Health**, 2018, 1, 1-5.

HAN, J. et al. Need for assessing the inhalation of micro(nano)plastic debris shed from masks,

respirators, and home-made face coverings during the COVID-19 pandemic. **Environmental Pollution**, 2021, 268, 115728.

HU, T. et al. Wet wipes and disposable surgical masks are becoming new sources of fiber microplastic pollution during global COVID-19. **Environmental Science and Pollution Research**, 2022, 29, 284-292.

KHALED, A. et al. Phototransformation of plastic containing brominated flame retardants: enhanced fragmentation and release of photoproducts to water and air. **Environmental Science & Technology**, 2018, 52, 11123-11131.

LI, L. et al. COVID-19: Performance study of microplastic inhalation risk posed by wearing masks. **Journal of Hazardous Materials**, 2021, 411, 124955.

LIU, K. et al. Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. **Science of the Total Environment**, 2019, 75, 462-471.

MA, J. et al. Face masks as a source of nanoplastics and microplastics in the environment: Quantification, characterization, and potential for bioaccumulation. **Environmental Pollution**, 2021, 288, 117748.

MYLLÄRI, V. et al. A comparison of rheology and FTIR in the study of polypropylene and polystyrene photodegradation. **BioImpacts**, 2017, 7, 73-74.

NAMAZI, H. Polymers in our daily life. **Journal of Applied Polymer Science**, 2015, 132, 42246.

NAPPER, I. et al. The distribution and characterization of microplastic in air, surface water and sediment within a major river system. **Science of the Total Environment**, 2023, 901, 166640.

PATRÍCIO SILVA, A. et al. Risks of Covid-19 face masks to wildlife: Present and future research need. **Science of the Total Environment**, 2021, 792, 148505.

PIZARRO-ORTEGA, C. et al. Degradation of plastics associated with the COVID-19 pandemic. **Marine Pollution Bulletin**, 2022, 176, 113474.

PRATA, J. et al. Airborne microplastics: Consequences to human health? **Environmental Pollution**, 2018, 234, 115-126.

PRATA, J. et. al. COVID-19 pandemic repercussions on the use and management of plastics. **Science & Technology**, 2020.

QU, G. et al. An Imperative Need for Research on the Role of Environmental Factors in Transmission of Novel Coronavirus (COVID-19). **Environmental Science & Technology**, 2020.

REID, A. et al. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. **Biological Reviews**, 2018, 94, 849-873.

SALIU, F. et al. The release process of microfibers: from surgical face masks into the marine environment. **Environmental Advances**, 2021, 4, 1000042.

SELVARANJAN, K. et al. Environmental challenges induced by extensive use of face masks during COVID-19: A review and potential solutions. **Environmental Challenges**, 2021, 3, 100039.

SHEN, M. et al. Neglected microplastics pollution in global COVID-19: Disposable surgical masks. **Science of the Total Environment**, 2021, 790, 148130.

SONG, Y. et al. Combined Effects of UV Exposure Duration and Mechanical Abrasion on Microplastic Fragmentation by Polymer Type. **Environmental Science & Technology**, 2017, 51, 4368-4376.

ter HALLE, A. et al. Understanding the fragmentation pattern of marine plastic debris. **Environmental Science & Technology**, 2016, 50, 5668-5675.

TANG, S. et al. Aerosol transmission of SARS-CoV-2? Evidence, prevention and control

**Environment International**, 2020, 144, 106039.

TESFALDET, Y. et al. Assessing face masks in the environment by means of the DPSIR framework. **Science of the Total Environment**, 2022, 814, 152859.

TIAN, L. et al. Human Nasal Olfactory Deposition of Inhaled Nanoparticles at Low to Moderate Breathing Rate. **Journal of Aerosol Science**, 2017, 113, 189-200.

THOMPSON, R. et al. Lost at Sea: Where is All the Plastic? **Science**, 2004, 304 (5672), 838-838.

UEKI, H. et al. Effectiveness of Face Masks in Preventing Airborne Transmission of SARS-CoV-2. **mSphere**, 2020, 5.

URBAN, R. et al. COVID-19 pandemic: Solid waste and environmental impacts in Brazil. **Science of the Total Environment**, 2021, 755, 142471.

WANG, Z. et al. Disposable masks release microplastics to the aqueous environment with exacerbation by natural weathering. **Journal of Hazardous Materials**, 2021, 417, 126036.

ZHANG, Q. et al. A Review of Microplastics in Table Salt, Drinking Water, and Air: Direct Human Exposure. **Environmental Science & Technology**, 2020, 54, 3740-3751.

ZHANG, Y. et al. Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. **Earth-Science Reviews**, 2020, 203, 103118.