

UFSCar – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CCET – CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E

TECNOLOGIA DQ – DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

*Trabalho de Conclusão de Curso*

Larissa Batista Nardini

Impactos Ambientais e Soluções Sustentáveis para o  
Descarte de Máscaras Faciais Descartáveis: Reciclagem e  
*Redesign*

Fevereiro 2025

São Carlos

Larissa Batista Nardini

Impactos Ambientais e Soluções Sustentáveis para o  
Descarte de Máscaras Faciais Descartáveis: Reciclagem e  
Redesign

Trabalho de conclusão de  
curso apresentada ao  
Departamento de Química da  
Universidade Federal de São  
Carlos, para obtenção do título de  
Bacharel em Química

Orientador(a): Profa. Sandra A. Cruz

Fevereiro 2025

São Carlos



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 8/2025/DQ/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

LARISSA BATISTA NARDINI

IMPACTOS AMBIENTAIS E SOLUÇÕES SUSTENTÁVEIS PARA O DESCARTE DE MÁSCARAS FACIAIS  
DESCARTÁVEIS: RECICLAGEM E REDESIGN

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 10 de fevereiro de 2025

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Profa. Dra. Sandra Andrea Cruz
Membro da Banca 1	Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa
Membro da Banca 2	MSc. Robert Paiva



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Samuel Schwab, Professor(a)**, em 14/02/2025, às 16:28, 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 **1747589** e o código CRC **C17E4505**.

---

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

SEI nº 1747589

*Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019*

## Resumo

A pandemia de COVID-19 intensificou a produção e o uso de máscaras faciais descartáveis, feitas de tecido não tecido. Embora essenciais para controle sanitário, seu descarte inadequado tem causado impactos ambientais significativos, como o aumento de microplásticos em ecossistemas terrestres e aquáticos. Este estudo revisa todo impacto ambiental causado pelo descarte inadequado das máscaras e consequentemente desafios para a reciclagem. O presente estudo traz uma revisão da composição completa da máscara, indicando ser um material constituído por diferentes polímeros, sendo polipropileno, poli (tereftalato de etileno), polietileno e poliuretano e a presença de um metal que se encontra na região moldável do nariz. Sendo assim, com a complexa e variável constituição da máscara, a tentativa de reciclagem tem como resultado uma blenda imiscível e incompatível, que torna o processo ainda mais difícil. Sendo assim, a solução para essa problemática pode ser o *redesign* e produção com um único componente, o polipropileno. Este estudo conclui que, para mitigar os impactos ambientais, é essencial integrar estratégias e processos de reciclagem mais eficientes, reduzindo assim a poluição causada pelo descarte inadequado das máscaras descartáveis.

Palavras chaves: Impacto ambiental; Máscaras faciais descartáveis; Reciclagem; Redesign.

## Abstract

The COVID-19 pandemic has increased the production and use of disposable face masks made of non-woven fabric. Although essential for health control, their improper disposal has caused significant environmental impacts, such as the increase in microplastics in terrestrial and aquatic ecosystems. This study reviews all the environmental impacts caused by the improper disposal of masks and, consequently, the challenges for recycling. This study provides a review of the complete composition of the mask, indicating that it is a material composed of different polymers, namely polypropylene, polyethylene terephthalate, polyethylene and polyurethane, and the presence of a metal found in the moldable region of the nose. Therefore, with the complex and variable composition of the mask, attempts to recycle it result in an immiscible and incompatible blend, which makes the process even more difficult. Therefore, the solution to this problem may be the redesign and production with a single component, polypropylene. This study concludes that, to mitigate environmental impacts, it is essential to integrate more efficient recycling strategies and processes, thus reducing pollution caused by the improper disposal of disposable masks.

Keywords: Environmental impact; Disposable face masks; Recycling; Redesign.

## Lista de Figuras

**Figura 1** - Coleção de várias máscaras faciais Covid-19 de diferentes tipos e cores do leite do oceano Mediterrâneo: leite oceânico do Mediterrâneo.

**Figura 2** - Estrutura química do polipropileno (PP)

**Figura 3** – Obtenção do poli (tereftalato de etileno) (PET)

**Figura 4** – Constituição da máscara facial

**Figura 5** - Os quatro estágios da coalescência das partículas

**Figura 6** – Estrutura química do titanato neoalcóxi presente no Ken-React® CAPES® KPR® 12/LV

**Figura 7** – Espectro de FTIR-ATR das as curvas: ES, MF, “*elastic band*” da alça auricular e “*wire cover*” material que reveste o arame moldável da máscara, do estudo de caso.

**Figura 8** – Curvas de tensão (MPa) em função da deformação (%) representativas referentes aos ensaios mecânicos para as amostras do estudo de caso.

**Figura 9** - Viscosidade complexa versus frequência para as diferentes amostras estudadas.

**Figura 10** – Micrografias das blendas: sem compatibilizante, com 1,0 e com 1,5% em massa de compatibilizante, respectivamente, do estudo de caso.

## Lista de Siglas e Abreviações

EPIs - Equipamentos de Proteção Individual

OMS – Organização Mundial da Saúde

PP - Polipropileno

TPE - Elastômero termoplástico

PVC - Poli(cloreto de vinila)

SMS - *Spunbond Meltblown Spunbond*

LLDPE - Polietileno linear de baixa densidade

LDPE - Polietileno de baixa densidade

HDPE - Polietileno de alta densidade

PC - Policarbonato

CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

ISO - *International Organization for Standardization*

PE - Polietileno

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

PET - Poli (tereftalato de etileno)

MF - *Mask Face*

ES - *Ear Straps*

EB - *Elastic Band*

WC - *Wire Cover*

TN - Titanatos neoalcóxi

FTIR-ATR - espectroscopia infravermelha de transformada de Fourier – reflectância total atenuada

DSC - Calorimetria Exploratoria Diferencial

TGA - Termogravimetria

TiO<sub>2</sub> - Dióxido de Titânio

PLA - Poli(ácido láctico)

## Sumário

Resumo	5
Abstract	6
Lista de Figuras	7
Lista de Siglas e Abreviações	8
1. Introdução	10
2. Revisão da Literatura	13
2.1. Impactos ambientais e desafios para a reciclagem	13
2.2. Composição das máscaras	15
2.3. Métodos de reciclagem	20
2.3.1. <i>Tentativa e métodos de reciclagem</i>	20
2.3.2. <i>Blendas poliméricas e compatibilizantes</i>	22
2.3.3. <i>Estudo de caso: Uso de compatibilizante organometálico na reciclagem de máscaras a base de PP e PET via Drais</i>	25
2.3.3.1. <i>Objetivo do estudo de caso</i>	26
2.3.3.1. <i>Materiais e métodos</i>	26
2.3.3.1. <i>Resultados e discussão</i>	27
2.4. Proposta de Redesign das Máscaras para Melhor Reciclagem	32
3. Considerações Finais	34
Referências Bibliográficas	35

## 1. Introdução

O surgimento do vírus SARS-CoV-2 e sua disseminação sem precedentes acarretou na declaração de uma pandemia pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Em março de 2020, foi decretado o uso obrigatório de máscara facial para cobrir a boca e as vias aéreas em locais públicos, somado ao distanciamento e o isolamento social, a fim de combater a doença COVID-19. O aumento rápido e repentino da demanda por máscaras descartáveis gerou uma pressão sem precedentes na cadeia de suprimentos global. Estima-se que bilhões de máscaras passaram a ser utilizadas diariamente, principalmente os modelos cirúrgicos e as máscaras N95, que são de extrema eficácia na filtração de partículas. Este cenário foi intensificado pela implementação de regulamentações que tornaram o uso de máscaras obrigatório em diversos países, tanto em espaços públicos quanto no ambiente de trabalho. Assim, muitas pessoas, preocupadas com a segurança, compraram grandes quantidades de máscaras para se proteger. Profissionais da saúde, que já utilizavam máscaras regularmente, passaram a precisar de muito mais unidades para lidar com o alto número de pacientes infectados. Desse modo, esse aumento da procura por máscaras faciais acarretou em diversos problemas, já que foi estimado que cerca de sete bilhões de máscaras faciais seriam descartadas diariamente em todo o mundo, principalmente em aterros sanitários ou incineradores (Behera, B. C. 2021; Patrício Silva, A. L.2021).

Nesse contexto, a implementação do uso obrigatório de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) em espaços públicos, representa um desafio para a gestão de resíduos convencionais, fazendo com que a poluição plástica se torne ainda mais grave (Akhbarizadeh *et al.*, 2021; Arduzzo *et al.*, 2021; Prata *et al.*, 2020). Em uma revisão, Hiemstra *et al.* (2021) evidenciaram peixes e aves aprisionados em EPIs, bem como casos de ingestão de máscaras faciais por animais urbanos e domésticos. Estudos também indicam que as máscaras faciais descartáveis têm o potencial de liberar contaminantes químicos e microfibras para o ambiente (Sullivan *et al.*, 2021). De fato, a poluição de EPIs, especialmente o seu descarte inadequado, pode acarretar em impactos ambientais a curto e longo prazo (Aragaw, 2020; De-la-Torre e Aragaw, 2021; Fadare e Okoffo, 2020; Torres 2021).

Com o aumento inesperado do consumo de EPIs, diversos estudos estimaram o uso de máscaras faciais, em áreas urbanizadas. Por exemplo, Boroujeni *et al.* (2021) estimaram que na Austrália, o consumo diário de máscaras faciais ultrapassou o valor de 5 milhões de unidades diárias em um cenário de uso único. Ou seja, em países com grande número de

habitantes, como a China por exemplo, o uso diário de máscaras faciais poderia alcançar centenas de milhões de unidades (Sangkham, 2020; Torres 2021).

Portanto, a pandemia de COVID-19 gerou não apenas uma crise sanitária, mas também um grande aumento no uso de plásticos descartáveis, resultando em uma nova onda de poluição ambiental. Esse aumento no consumo de EPIs, em sua maioria não recicláveis até o momento, levou ao acúmulo desses resíduos nas ruas, nos sistemas de drenagem e nos oceanos.

No início da pandemia, foi relatada a presença de grandes quantidades de máscaras faciais no oceano, como observado em Hong Kong, evidenciando o impacto ambiental gerado pelo descarte inadequado desses materiais. Esse fenômeno exemplifica como a crescente demanda por máscaras descartáveis contribuiu para a poluição marinha. Da mesma forma, uma organização não governamental ambientalista francesa documentou o acúmulo de máscaras cirúrgicas no fundo do mar Mediterrâneo, na cidade costeira de Antibes, em junho de 2020. O uso massivo de máscaras durante a emergência de saúde global ressaltou a intensificação da poluição ambiental, tanto em ecossistemas terrestres quanto aquáticos, demonstrando que a pandemia de COVID-19 agravou a crise da poluição por plásticos, como ilustrado na Figura 1 (Aragaw, 2020).

Figura 1 – Coleção de várias máscaras faciais Covid-19 de diferentes tipos e cores do leito do oceano Mediterrâneo (Aragaw 2020).



FONTE: Aragaw (2020)

As máscaras faciais descartáveis, compostas principalmente por polipropileno e outros polímeros sintéticos, têm se acumulado no ambiente, tornando-se uma fonte emergente de fibras microplásticas. A degradação desses materiais ocorre devido a fatores ambientais, como variações de temperatura, umidade e exposição solar, resultando na fragmentação em pequenas partículas (Schmidt et al., 2018). Além disso, sua composição complexa, que inclui tiras elásticas, arames metálicos e adesivos para melhor ajuste e conforto, dificulta tanto o descarte adequado quanto a reciclagem. A presença de múltiplos materiais em um único produto torna inviável sua separação nos sistemas tradicionais de reciclagem, evidenciando a necessidade de um *redesign* para mitigar seu impacto ambiental.

A possibilidade de um *redesign* das máscaras descartáveis leva em consideração aspectos de sustentabilidade sem comprometer sua eficácia. O *redesign* de produto consiste na atualização e modificação de um item existente com o objetivo de aprimorar sua funcionalidade, estética, desempenho, usabilidade ou destino final (AWARI 2023)

O *redesign* sustentável tem se tornado uma prioridade em diversos setores devido à crescente preocupação com o impacto ambiental e à busca por soluções mais ecológicas. Uma abordagem eficaz para minimizar esse impacto na realidade polimérica é a utilização de termoplásticos reciclados, que oferecem uma alternativa sustentável aos materiais convencionais. Esses plásticos contribuem para a redução da extração de recursos naturais, como o petróleo, diminuindo a quantidade de resíduos em aterros sanitários e a pegada de carbono associada à produção de novos plásticos. A implementação de padrões regulatórios que incentivem o desenvolvimento de máscaras mais sustentáveis é outro passo essencial para minimizar os impactos ambientais associados a esse produto.

Embora as máscaras faciais descartáveis tenham desempenhado um papel vital na mitigação da pandemia, sua composição complexa e os desafios associados ao descarte destacam a necessidade urgente de inovação e *redesign*. Adotar soluções que combinem eficiência protetiva e sustentabilidade ambiental é crucial para responder aos desafios globais contemporâneos e preparar-se para futuras crises de saúde pública. (Seoane et al. 2023)

Dessa forma, a presente revisão da literatura tem como objetivo explorar a reciclagem e o *redesign* de máscaras faciais descartáveis. Inicialmente, serão apontados impactos ambientais e desafios para a reciclagem. Em seguida, será abordado a composição complexa da máscara. Posteriormente, será apresentado possíveis métodos

de reciclagem. Finalmente, será discutida proposta de *redesign* das máscaras para uma melhor reciclagem.

## 2. Revisão da Literatura

### *2.1. Impactos ambientais e desafios para a reciclagem*

O descarte inadequado de máscaras descartáveis tem se tornado um problema global, gerando sérias problemáticas no meio ambiente. Muitos países ainda carecem de sistemas apropriados e direcionados à coleta e principalmente à gestão desses resíduos plásticos (Sangkham, 2020). Como consequência, grandes quantidades de partículas plásticas acabam se acumulando no ambiente, sendo despejados em ruas, aterros e no meio aquático. Essa prática agrava a contaminação de rios, lagos e oceanos, aumentando a presença de plásticos nos ecossistemas (Selvaranjan, 2021).

Somado ao descarte, a fabricação de máscaras faciais contribui para as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o que acelera de forma potencial o aquecimento global (Liebsch, 2020). Materiais como polipropileno, alumínio e outros componentes usados na produção de máscaras cirúrgicas e N95 são responsáveis por uma parte considerável dessas emissões. Até mesmo a produção de máscaras de pano, envolvendo etapas como a confecção de tecidos e a costura, também libera quantidades de CO<sub>2</sub> (Selvaranjan, 2021).

Por exemplo, a produção de uma máscara N95 gera 50 g de CO<sub>2</sub> por unidade, enquanto uma máscara cirúrgica produz 59 g de CO<sub>2</sub>, sendo que a maior parte é atribuída ao transporte (Kleme 2020). Máscaras de pano, por sua vez, liberam cerca de 60 g de CO<sub>2</sub> por unidade. Esses números passam a ser drásticos ao considerar a produção alarmante de máscaras para atender à demanda global durante a pandemia (Selvaranjan 2021).

Pesquisas realizadas no Reino Unido estimam que o uso diário de máscaras cirúrgicas descartáveis por cada pessoa ao longo de um ano resultaria na geração de mais de 120.000 toneladas de plásticos não recicláveis, além de 65.000 toneladas de resíduos contaminados e 57.000 toneladas de embalagens plásticas (Ayse, 2020). No entanto, a falta de sistemas específicos para o descarte adequado desses materiais faz com que o descarte incorreto dessas máscaras gera acúmulo nas ruas e mistura ao lixo comum, o que dificulta a implementação de soluções eficazes para essa questão ambiental (Selvaranjan, 2021).

A pandemia também trouxe desafios de grande valia para a gestão de resíduos urbanos e hospitalares, que é o fato das máscaras utilizadas em ambientes de saúde serem

encaminhadas para incineração ou descarte de aterros juntamente com outros resíduos mistos. No entanto, devido à alta concentração de plásticos nas máscaras, essas práticas podem causar impactos ambientais ainda mais negativos. Pois os plásticos, por sua natureza química, apresentam estabilidade e permanência a essas condições, e então são difíceis de degradar por microorganismos, permanecendo no solo por longos períodos e representando uma ameaça ambiental duradoura (Webb, 2013; Selvaranjan, 2021).

Uma possível solução para lidar com os resíduos médicos seria a incineração com recuperação de calor, que aproveita o conteúdo energético dos plásticos. A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda que o processo ocorra em temperaturas entre 900 °C e 1200 °C para garantir uma destruição segura. Contudo, essa faixa de temperatura nem sempre é atingida na prática (Kleme, 2020). Além disso, o uso generalizado da incineração enfrenta limitações devido a preocupações com as emissões de dioxinas e furanos que são substâncias nocivas ao meio ambiente. Outro desafio está no transporte dos resíduos para instalações adequadas, que consome energia e contribui para a emissão de gases de efeito estufa (Selvaranjan, 2021).

O descarte inadequado de máscaras em áreas abertas também traz riscos significativos para a fauna. Animais podem se enredar nesses materiais, sofrendo lesões graves ou até mesmo morrendo. Um caso ocorrido na Colômbia relatou a morte de um pássaro preso em uma máscara descartável, em que a máscara ficou presa ao seu corpo e no bico, o que impossibilitou a sobrevivência desse animal (Boyle, 2020). Além disso, quando ingeridas por engano, elas podem causar desnutrição em animais, levando-os eventualmente à morte.

Outro impacto preocupante é a fragmentação dos macrolásticos das máscaras, que pode ocorrer devido a fatores como fotodegradação, intempéries e longa exposição em ambientes aquáticos. Isso resulta na formação de microplásticos secundários (Yang, 2020). Estes microplásticos podem se acumular ao longo da cadeia alimentar, impactando até mesmo na sobrevivência humana, carregando toxinas que se integram aos organismos vivos, logo causando impactos tanto ambientais quanto de saúde (Selvaranjan, 2021).

Por fim, todas as máscaras, independentemente do tipo, devem ser descartadas de maneira adequada, abrangendo etapas como segregação, quando aplicável esterilização, para que se possível e se viável, seguir para a reciclagem. A reciclagem desses resíduos apresenta limitações significativas, especialmente no caso de EPIs médicos, devido ao risco de transmissão viral. Diversos programas piloto de reciclagem estão sendo implementados globalmente, como o TerraCycle nos Estados Unidos, Plaxtil na França e

Vitacore no Canadá, visando a conversão desses resíduos em materiais para construção de estradas, paletes plásticos, contêineres de armazenamento, entre outros. (Saikat 2022)

Nos países em desenvolvimento, a coleta e o descarte inadequados de resíduos representam um risco impactante à saúde pública (Bleck, 2009). Como mencionado anteriormente, a incineração não é um método usual para a eliminação das máscaras plásticas, devido aos gases tóxicos eliminados durante a queima das mesmas. Esse cenário destaca a necessidade de um gerenciamento mais eficaz no descarte de máscaras, além da urgência em prevenir a poluição ambiental (Kalina, 2020; Chen, 2021; Maria Idrees, 2022). Nesse contexto, a reciclagem de máscaras descartáveis surge como uma abordagem viável, embora ainda com dificuldades. Com a aplicação de métodos adequados de desinfecção, esse processo pode ser implementado de forma segura, ajudando a mitigar os impactos ambientais e contribuindo para soluções sustentáveis no manejo de resíduos.

## 2.2 Composição das máscaras

As máscaras cirúrgicas são compostas, em sua maioria, por camadas de polipropileno não tecido, e uma delas atuando como filtro. Outros tipos de máscaras como N95, KN95, FFP2 e FFP3 também utilizam polipropileno não tecido, complementado por filtros eletrostáticos (Klimek, 2020). Alguns modelos de máscara incluem aditivos específicos para melhorar suas características. Entre os aditivos mais comuns estão plastificantes, antioxidantes sintéticos e componentes metálicos, que aprimoram propriedades como resistência e funcionalidade. Contudo, à medida que as máscaras se decompõem no meio ambiente, esses aditivos podem ser liberados, gerando danos extremamente preocupantes aos ecossistemas terrestres e aquáticos (Lyu 2024).

O polipropileno (PP), amplamente utilizado na fabricação de máscaras faciais descartáveis, oferece muitas vantagens quando comparado a outros materiais como elastômeros termoplásticos (TPE) ou poli(cloreto de vinila) (PVC). A densidade de suas fibras contribui para uma filtragem mais eficiente de partículas, bactérias e gotículas, enquanto sua propriedade hidrofóbica garante melhor resistência a líquidos, protegendo contra respingos (Gobikannan 2023).

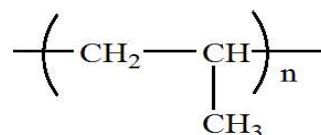
Outro benefício do polipropileno é seu baixo custo e fácil produção em larga escala, utilizando técnicas como *spunbond* (Zhao 2021). Suas propriedades não tóxicas tornam-no uma escolha ideal para pessoas com alergias ou pele sensível (Thadepalli 2022). Contudo, as máscaras feitas de PP apresentam um impacto ambiental significativo, já que sua

composição não biodegradável contribui para a poluição dos ecossistemas (Mohana 2023, Lyu 2024).

As características fundamentais das máscaras desempenham um papel crucial em suas aplicações, como a flexibilidade e elasticidade das máscaras que são essenciais para garantir um ajuste seguro ao rosto, enquanto a resistência mecânica desempenha um papel importante na durabilidade e na resistência ao rasgo, características que podem ser aproveitadas em futuras aplicações em outros produtos (Ahmad 2022; Lyu 2024). A molhabilidade da superfície, seja ela hidrofílica ou hidrofóbica, também influencia diretamente a respirabilidade e a adequação à umidade (Raman 2021). Além disso, a superfície das máscaras, que pode ser lisa ou texturizada, afeta propriedades como adesão e atrito, o que abre caminho para novas aplicações (Cui 2023). A configuração dos poros, por sua vez, pode ser ajustada para otimizar o desempenho da filtração (Guselnikova 2022; Maderuelo-Sanz 2021), impactando assim na eficiência de filtração e a permeabilidade a líquidos, especialmente em máscaras de múltiplas camadas que possuem tamanhos e distribuições de poros variados (Park 2021).

A partir de estudos presentes na literatura e de pesquisas em campo, é possível afirmar que as máscaras faciais são compostas não somente por PP, mas também por poli(tereftalato de etileno) (PET) e Poliuretano (PU) na alça lateral. Bem como, a região moldável ao nariz é constituída por um arame envolto por Polietileno (PE). Segue na figura 2 a estrutura molecular do PP e uma breve descrição de suas características e propriedades.

Figura 2 – Estrutura química do PP



FONTE: Krey 2002

O polipropileno (PP) é um polímero linear cuja temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>) oscila entre -10 °C e 10 °C, ao passo que a sua temperatura de fusão (T<sub>m</sub>) é entorno de 160°C. O PP pode ser categorizado como isotático, sindiotático ou atático, com base na estrutura estereoquímica dos seus substituintes na sua cadeia principal. Um polímero isotático tem substituintes no mesmo lado do plano formado pela cadeia principal, enquanto no sindiotático, eles se alternam de maneira regular, e por sua vez, no atático, são distribuídos de maneira aleatória (Krey, 2002).

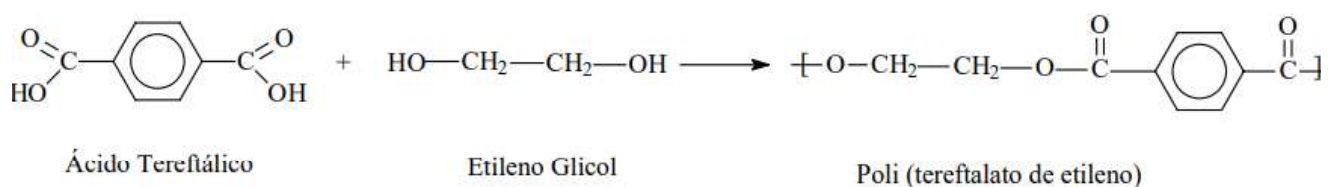
Nos polímeros de uso comercial, uma isotaticidade mais alta contribui para o incremento da cristalinidade, da temperatura de fusão e de características mecânicas, como a resistência à tração. O uso comercial do PP isotático é vasto, abrangendo desde não-tecidos até componentes injetados. Ele é usado extensivamente em produtos como para-choques, brinquedos, utensílios de casa, embalagens, equipamentos esportivos e até mesmo em fibras. Embalagens rígidas, tais como frascos, tampas e garrafas, podem ser fabricadas através de extrusão, sopro ou injeção/sopro (Vercelino et al. 1998).

O PP é notável por suas propriedades mecânicas (Borsig, 1999) e por suas características como boa resistência a esforços mecânicos (McLoughlin, 1997). Contudo, mesmo o PP sendo um polímero apolar, ele ainda sim, pode apresentar incompatibilidade com outros polímeros apolares.

A natureza apolar do PP afeta várias propriedades, incluindo sua reduzida capacidade de reter umidade, dificuldade em ser impresso ou pintado e a interação limitada com cargas inorgânicas (Naqvi, 1996). Para ultrapassar essas restrições, a modificação do PP através da inclusão de grupos polares se revela eficiente. Esta modificação não só amplia a compatibilidade do material com outros polímeros, como também intensifica sua adesão a diversas superfícies, como as metálicas (Fritz, 1993).

Já o poli(tereftalato de etileno) (PET) pertence à classe dos poliésteres e é obtido pela polimerização de um ácido dicarboxílico saturado com um glicol ou bifenol. O PET pode ser sintetizado a partir da reação entre ácido tereftálico e etilenoglicol, conforme ilustrado na figura 3.

Figura 3 – Obtenção do PET



FONTE: Krey 2002

O PET possui uma faixa de massa molar média numérica que varia de 18.000 a 42.000 g/mol. Sua temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>) está em torno de 69 °C, enquanto sua temperatura de fusão (T<sub>m</sub>) é de aproximadamente 265 °C (CANEVAROLO, JR., 2006, p.162).

O PET, por possuir alta temperatura de fusão e cadeias moleculares rígidas, tem

uma excelente resistência mecânica, possui também excelentes propriedades de barreira ao CO<sub>2</sub> e elevada resistência química. Contudo, um dos seus principais obstáculos é a fraca resistência ao impacto. No começo, era amplamente utilizado na indústria têxtil, sendo empregado na fabricação de fibras para vestuário, cortinas, estofados, pneus, linhas e outros. Atualmente, o PET é também empregado em filmes fotográficos, fitas, filmes metalizados, raios-X e materiais para isolamento elétrico, conforme mencionado por Odian *et al.*

O PET atua como um plástico de engenharia, substituindo metais como o alumínio e o aço na produção de moldes para peças automotivas, dispositivos eletrônicos, aparelhos elétricos e também utensílios domésticos. Para melhorar suas características mecânicas, é comum que ele seja reforçado com fibra de vidro ou combinado com materiais como grafite, Teflon e até silicones (Caldeira, 2011).

Os poliuretanos (PU) são amplamente utilizados na produção de espumas, mas suas aplicações se estendem a várias outras áreas devido à diversidade de matérias-primas empregadas em sua síntese. São, geralmente, copolímeros com segmentos de diferentes características físico-químicas, que frequentemente não se misturam. Um bloco é flexível em temperatura ambiente (bloco macio), enquanto o outro mantém-se rígido até cerca de 100 °C. Essas propriedades estão relacionadas com as estruturas químicas dos segmentos (Fiorio, 2011).

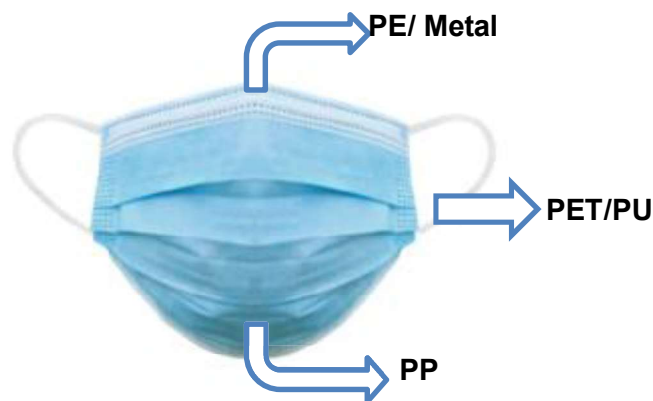
Classificados em termorrígidos ou termoplásticos, dependendo da presença ou não de reticulações, os poliuretanos termoplásticos (TPU) possuem cadeias lineares sem reticulações. Nesses materiais, os blocos flexíveis oferecem elasticidade, e os blocos rígidos proporcionam pontos de reticulação física através das ligações de hidrogênio dos grupos uretano. Como resultado, os TPU combinam as características de elasticidade dos elastômeros vulcanizados com a processabilidade dos polímeros termoplásticos. São utilizados em diversas indústrias, como a eletrônica, automotiva, calçadista e de automação, destacando-se pela resistência à abrasão, rasgo e tração, além de flexibilidade em baixas temperaturas (Fiorio, 2011).

Um outro constituinte da máscara é polietileno de alta densidade, que reveste o material metálico, é caracterizado pelo seu alto grau de cristalinidade, superior a 90%, devido à sua estrutura com baixo índice de ramificações. Possui uma temperatura de fusão em torno de 132 °C (Coutinho, 2003). Este material é amplamente reconhecido entre os termoplásticos por sua atoxicidade, o que o torna adequado para uso em contato com alimentos principalmente. Suas propriedades incluem alta resistência, baixo atrito,

facilidade de processamento, impermeabilidade a líquidos e gases, além de excelente resistência química e baixa absorção de umidade (Coutinho *et al.*, 2003).

A partir do exposto, nota-se que esses quatro polímeros são diferentes entre si, possuem características diferentes e aplicações diferentes. Mas, juntos eles compõem a máscara descartável, como ilustrado na figura 4.

**Figura 4** – Constituição da máscara facial



Sendo assim, toda essa constituição complexa faz com que o processo de reciclagem seja dificultado, uma vez que cada um desses materiais possui diferentes propriedades físicas e químicas, o que dificulta o processo de reciclagem, já que as técnicas de processamento precisam ser específicas para cada tipo de polímero. Quando diferentes plásticos como PP, PET, PU e PE são processados juntos, eles não se fundem homogêaneamente, o que resulta em materiais reciclados de baixa qualidade, isso torna o produto reciclado pouco utilizável para aplicações de alta qualidade.

Como mencionado por Lyu *et. al* (2024), o fato de entender as características físicas das máscaras faciais, impulsiona o desenvolvimento e aprimoramento dos métodos de reciclagem, reutilização e também o desenvolvimento de novos produtos a partir desses materiais. Sendo assim, ao considerar aspectos como a estrutura dos poros, bem como a composição do material, a textura da superfície, a molhabilidade, a flexibilidade, a elasticidade e a resistência mecânica, é possível formular soluções mais sustentáveis. Essa análise detalhada pode não apenas ajudar a superar os desafios do gerenciamento de resíduos, mas também promover iniciativas de reciclagem e contribuir para a criação de soluções inovadoras e sustentáveis no cenário pós-pandemia.

## 2.3. Métodos de Reciclagem

### 2.3.1 Tentativas e Métodos de Reciclagem

As máscaras descartadas podem ser recicladas por meio de diversas metodologias e reaproveitadas como materiais suplementares em produtos, como componentes para a construção civil (Selvaranjan, 2021).

Essa estratégia contribui tanto para a redução de resíduos quanto para a melhoria das propriedades mecânicas de materiais como o concreto (Selvaranjan, 2021). Alguns estudos já demonstraram o uso de máscaras combinadas com polpa de papel em misturas de concreto (Parija 2020). Outra aplicação desenvolvida envolve a utilização de fibras trituradas de máscaras em camadas de pavimentação e estradas (Saberian 2021).

O estudo conduzido por Crespo *et al.* propõe uma abordagem de reciclagem mecânica de máscaras faciais FFP2. A reciclagem mecânica é o processo de transformar materiais recicláveis, em novos produtos por meio de processos físicos. Isso geralmente envolve a coleta, triagem, limpeza e fragmentação dos materiais, que são então moldados ou transformados em novos itens. É uma forma eficiente de reutilizar materiais, reduzindo o desperdício e o uso de recursos naturais. Essas máscaras estudadas são compostas principalmente por polipropileno (PP) e polietileno (PE), apresentam potencial de recuperação, já que a mistura de PP e PE é amplamente utilizada na reciclagem de resíduos termoplásticos. Outro estudo que explorou essa abordagem foi Fang *et al.*, onde estudaram o uso de nanopartículas e compatibilizadores na tentativa de reciclar as máscaras, enquanto Clemons (Clemons, 2010) aplicou essa tentativa de reciclagem para a produção de compostos plásticos de madeira.

Os resultados de Crespo *et al.* destacam avanços na reutilização do material empregado na constituição das máscaras faciais após o uso. O estudo propôs um método eficiente para reciclar máscaras FFP2, utilizando protocolos convencionais de reciclagem mecânica de termoplásticos. A mistura resultante pode ser processada em equipamentos industriais, como extrusoras e máquinas de moldagem por injeção, e apresenta propriedades mecânicas adequadas para a fabricação de produtos como vasos, caixas de armazenamento, paletes e brinquedos, especialmente em aplicações com exigências técnicas menores, oferecendo uma alternativa ao PP reciclado. Por fim, há a proposta de uma continuidade na pesquisa para aperfeiçoar as propriedades mecânicas e térmicas do material reciclado. Para isso, planeja-se uma aplicação de agentes compatibilizantes e aditivos, com o objetivo de melhorar a caracterização do material e ampliar suas possíveis (Crespo, 2021).

Outro trabalho relevante é o de Battezzore *et al.*, que fez uma análise abrangente dos materiais presentes em máscaras cirúrgicas, considerando aspectos térmicos, químicos e morfológicos. A partir dos resultados obtidos, foram testadas diferentes estratégias de reciclagem, concluindo que os materiais das máscaras podem ser reciclados mecanicamente. Os quatro tipos de materiais presentes na máscara demonstraram potencial para aplicações industriais em larga escala. No entanto, a variabilidade dos materiais usados na fabricação de máscaras evidencia a necessidade de estratégias de reciclagem mais específicas e adaptáveis. Isso exige novas investigações para melhorar o desempenho dos materiais reciclados, especialmente por meio da combinação com polímeros virgens ou pela adição de compatibilizantes. Embora ainda sejam necessários estudos adicionais para superar esses desafios, o trabalho de Battezzore *et al.* trouxe contribuições significativas ao apresentar soluções concretas para a reciclagem somente do material da face de três camadas, mas que mesmo apresentando uma viscosidade complexa baixa, ainda assim pode ser explorado em uma mistura com um PP de primeiro uso com viscosidade mais alta para uso direto em aplicações como moldagem por injeção ou extrusão da máscara, de equipamentos de proteção individual.

### 2.3.2 *Blendas poliméricas e compatibilizantes*

Considerando a reciclagem das máscaras, com foco no material predominante em sua composição (desconsiderando o metal moldável), seria obtida uma blenda heterogênea multifásica, já que as máscaras são compostas por quatro diferentes polímeros, como mencionado anteriormente. Assim como apontado no estudo de Caldeira *et al.*, a criação de novos materiais poliméricos por meio da mistura de diferentes polímeros com o objetivo de combinar suas propriedades específicas, é uma prática comum na indústria, sendo frequentemente mais vantajosa do ponto de vista econômico e mais rápida do que o desenvolvimento de novos monômeros ou métodos de polimerização (Caldeira, 2011).

A principal vantagem das blendas de polímeros é a flexibilidade em suas propriedades, que podem ser controladas conforme a composição e a compatibilização, quando necessário. A reciclagem desses materiais é mais desafiadora em relação aos polímeros puros. Utracki *et al.* apontam que, no caso das blendas compatibilizadas, a reciclagem pode ser facilitada. As blendas poliméricas se dividem em duas categorias: miscíveis e imiscíveis, com a miscibilidade sendo definida termodinamicamente, quando os segmentos moleculares se misturam sem separação de fases, demonstrando uma homogeneidade (UTRACKI, 1990, p. 2).

No contexto termodinâmico, a energia livre de Gibbs para uma mistura pode ser expressa pela seguinte equação:

$$\Delta G_{\text{mis}} = \Delta H_{\text{mis}} - T\Delta S_{\text{mis}} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que  $\Delta G_{\text{mis}}$  representa a variação da energia livre da mistura;  $\Delta H_{\text{mis}}$  e  $\Delta S_{\text{mis}}$  são, respectivamente, a variação da entalpia e a variação da entropia da mistura, e  $T$  é a temperatura expressa em kelvin.

A variação entálpica ( $\Delta H_{\text{mis}}$ ) influencia a espontaneidade da mistura de polímeros. Frequentemente, a mistura de polímeros é endotérmica ( $\Delta H_{\text{mis}} > 0$ ), gerando energia livre positiva e, conseqüentemente, uma mistura imiscível, com fases separadas (Sperling, 2006). Para que uma mistura possa ser miscível, sua energia livre deve ser negativa ( $\Delta G_{\text{mis}} < 0$ ). A entropia da mistura ( $\Delta S_{\text{mis}}$ ) diminui à medida que a massa molar dos polímeros aumenta, reduzindo o grau de liberdade das moléculas. Esse efeito pode contribuir para a melhoria das propriedades do material resultante. Desse modo, a Equação 1 é uma condição necessária, mas não é suficiente para a miscibilidade.

Apesar de frequentemente ser confundida com miscibilidade, a compatibilidade se refere à capacidade de uma mistura gerar características finais desejadas. Portanto, uma combinação pode ser imiscível e ainda assim compatível, enquanto uma combinação incompatível apresentará propriedades inferiores às dos polímeros puros (Caldeira, 2011).

Em contrapartida, em misturas imiscíveis, a inclusão de compatibilizantes pode aprimorar a adesão entre as fases. Isso possibilita a criação de uma mistura polimérica compatível, com características apropriadas para as aplicações definidas. Portanto, é possível avaliar tanto as propriedades de miscibilidade quanto de compatibilidade através da análise morfológica da blenda (Caldeira, 2011).

Os termos miscível e imiscível referem-se às propriedades intrínsecas do par polimérico, formando sistemas homogêneos ou não, enquanto os termos compatível e incompatível referem-se às características de desempenho do material, não importando sua morfologia. A compatibilidade pode ser modificada, a miscibilidade não, porque é uma propriedade termodinâmica intrínseca do sistema. A miscibilidade entre fases presentes no sistema está associada a variação de propriedades, ou seja, a miscibilidade determina, direta ou indiretamente, o comportamento do novo material desenvolvido.

As blendas poliméricas possuem diferentes morfologias, sendo algumas delas dispersão em gotas, lamelar, esferulítica, fibrilar, em rede e diversas outras. Na estrutura de gotas, pequenas partículas se encontram dispersas em uma matriz polimérica, o que é

ideal para produtos que necessitam de elevada resistência mecânica. A dimensão e a disposição da fase dispersa são cruciais para as características finais, tal como acontece nas blendas tenacificadas, onde uma fase elastomérica aumenta a tenacidade. Se a mistura for imiscível pode-se controlar e ajustar o tamanho e a dispersão, da fase minoritária, através da adição de compatibilizantes (WANG et al., 2003).

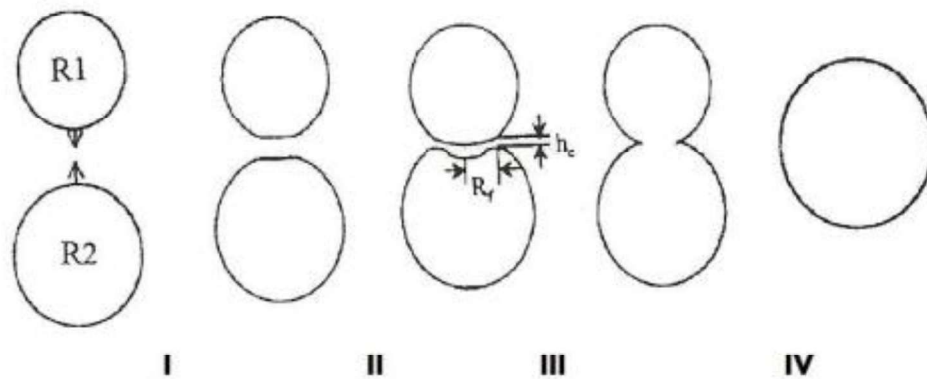
Frequentemente, as blendas imiscíveis têm um desempenho mecânico restrito devido à reduzida adesão interfacial, que resulta em acumulações de tensão. No entanto, a inclusão de aditivos compatibilizantes pode aprimorar essa adesão, simplificando a transferência de tensão entre as fases e diminuindo falhas nas interfaces. Como resultado, o desempenho mecânico tende a se aprimorar (Souza, 2002).

Há várias táticas de compatibilização, incluindo a aplicação de aditivos ou copolímeros em blocos. A incorporação de copolímeros se fundamenta na adição de moléculas que possuem segmentos quimicamente parecidos com os polímeros que os compõem, favorecendo uma interação e adesão melhoradas (Caldeira, 2011).

A compatibilização é considerada eficiente quando promove melhorias significativas nas propriedades mecânicas e morfológicas da blenda (Souza, 2002; Demarquette, 2001; Macaúbas, 2001). Essas melhorias estão listadas abaixo:

- 1) A redução da tensão interfacial entre os componentes da blenda é promovida pela adição de agentes compatibilizantes, e tem como consequência uma dispersão mais uniforme da fase dispersa. Esse processo ocorre até que a tensão interfacial seja reduzida, garantindo a estabilização e compatibilização do sistema;
- 2) A estabilidade morfológica da blenda é alcançada pela redução da coalescência das partículas da fase dispersa. Esse fenômeno envolve a fusão de duas ou mais partículas dispersas, formando uma partícula ainda maior, com o objetivo de reduzir a energia livre do sistema. O tamanho e a distribuição das partículas na matriz dependem diretamente desse processo, que pode ocorrer tanto durante o processamento da blenda (coalescência dinâmica) quanto após o processamento (coalescência estática). Esses fenômenos estão representados na figura 5:

**Figura 5** – Os quatro estágios da coalescência para uma blenda polimérica.



FONTE: Caldeira 2011.

Quando existe um agente compatibilizante na interface entre os polímeros, a coalescência é reduzida, já que o compatibilizante limita a mobilidade da interface. As moléculas da matriz interagem com as do agente de compatibilidade, resultando em um emaranhado que complica a drenagem do filme entre as partículas da fase dispersa. Isso impede o processo de coalescência, o que aumenta a compatibilidade da mistura (Caldeira, 2011; Lepers et al., 1999).

Portanto, a reciclagem das máscaras faciais é difícil tanto no ponto de vista químico, como termodinâmico, devido às diferenças significativas entre as propriedades físicas, químicas e térmicas dos constituintes, principalmente ao se tratar da incompatibilidade química, a imiscibilidade e a fraca interface, formando fases separadas, com baixa adesão e então resultando em propriedades mecânicas ruins, como baixa resistência à tração e à deformação. Logo, a compatibilização pode ser eficiente, pois pode ser possível controlar a morfologia desses materiais, uma vez que as propriedades deles estão diretamente relacionadas à sua morfologia.

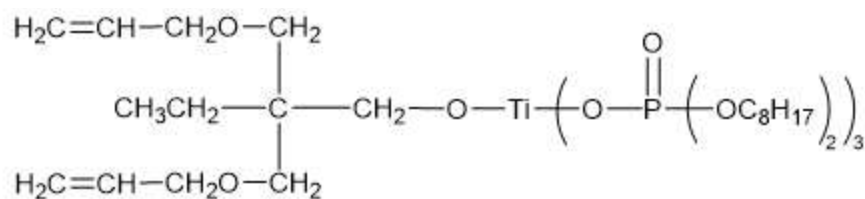
### *2.3.3 Estudo de caso: Uso de compatibilizante organometálico na reciclagem de máscaras a base de PP e PET via Drais*

No ano de 2022 e 2023, foi estudada a composição e reciclagem de pós consumo de máscaras faciais descartáveis, tendo como objetivo a caracterização completa para análise da composição das máscaras descartáveis, a fim de estudar a obtenção de um material reciclado e compatibilizado.

### 2.3.3.1 Objetivo do estudo de caso

O objetivo foi realizar uma caracterização detalhada das máscaras descartáveis, com foco na análise de sua composição e na aplicação de agentes compatibilizantes para obter um material reciclado com elevado grau de adesão entre as fases. Utilizou-se como agente de acoplamento o Ken-React® CAPS® KPR® 12/LV, um composto organometálico baseado em titanatos nealcóxi. A estrutura química do agente está apresentada na Figura 6. O CAPS® KPR® 12/LV está na forma de um *master-batch* com 20% de material ativo e com veículo polimérico a base de LLDPE (69%) e sílica amorfa hidratada (11%), disponibilizado na forma de *pellets*. A escolha do agente nesta forma baseou-se na praticidade do processo de reciclagem, permitindo um processamento e uma dosagem mais fácil do aditivo, além de evitar a absorção física do agente pelos componentes do sistema que pode resultar em superfícies não-compatibilizadas. Desse modo, a ideia foi é fornecer pontes moleculares na interface entre dois substratos, nesse caso sendo o PP e o PET com esse aditivo que pode reagir com prótons livres na interface, resultando na formação de camadas monomoleculares de titânio e sugerir uma certa “repolimerização” assistida por catálise metaloceno *in-situ* (pós-reator) da matriz polimérica de PP degradado.

**Figura 6** – Estrutura química do titanato nealcóxi presente no Ken-React® CAPES® KPR® 12/LV.



### 2.3.3.2 Materiais e métodos

As máscaras coletadas de diferentes procedências e localidades foram inicialmente individualizadas manualmente em termos de “*mask face*” (MF) and “*ear straps*” (ES). Todas as alças auriculares tem um um elástico interno denominado “*elastic band*” (EB). O arame nasal foi retirado manualmente, e não foi usado neste estudo. Mas ele é composto por um metal recoberto por um “*wire cover*” (WC) polimérico, para dar conforto ao usuário.

As partes individualizadas foram desinfetadas em uma autoclave a 121°C com pressão de 1,0 kgf.cm-2 por 15 minutos (Lin *et al.* 2017) e, posteriormente, secas em estufa a vácuo para retirar a umidade por 1 hora a 120°C.

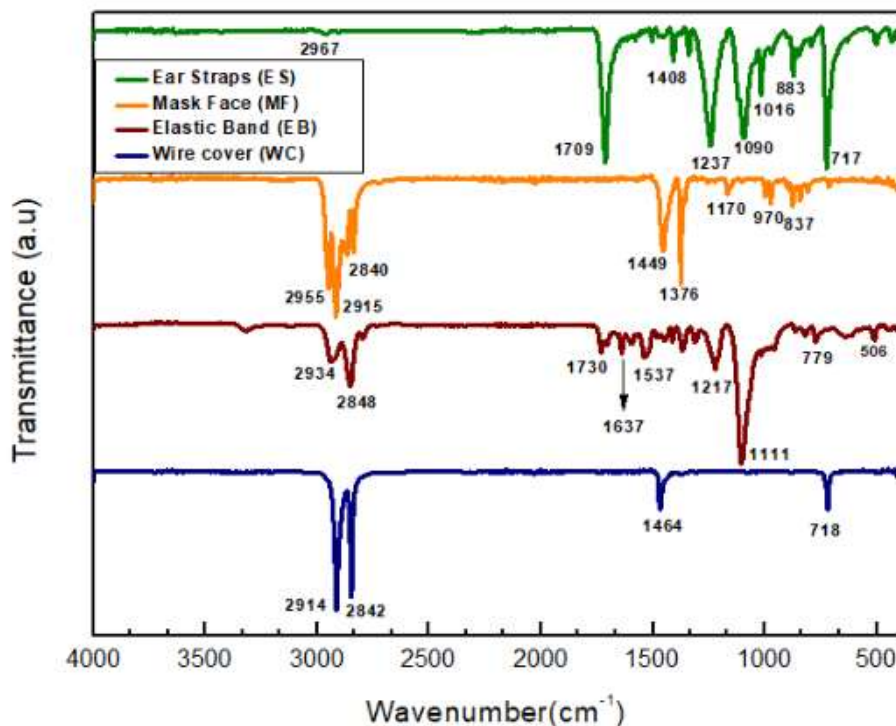
Em seguida, as faces desinfetadas e secas foram prensadas a 170°C, com uma pressão de 50 ton por 2 minutos. As alças auriculares foram prensadas a 250°C, com uma pressão de 50 ton, por 1 minuto, para adequação da forma. Por fim, as placas prensadas da face e das alças auriculares foram moídas criogenicamente em um moinho de facas, até estarem totalmente pulverizadas. As faces e as alças laterais elásticas pulverizadas foram misturadas fisicamente na proporção 85/15 (wt%), que corresponde à fração mássica de cada parte da máscara em relação à massa total.

O grau de adesão foi avaliado por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), analisando a seção transversal criofraturada. Essa análise buscou verificar a integridade e continuidade da interface, bem como o modo de fratura da fase dispersa, como indicadores da aderência entre as fases da mistura. Adicionalmente, foram realizados ensaios mecânicos de tração, comparando o desempenho do material reciclado compatibilizado com aquele não-compatibilizado. E ensaio de reologia, a fim de estudar o comportamento viscoelástico do material.

### 2.3.3.2 Resultados e discussão

Análises de FTIR foram realizadas tanto na superfície da máscara quanto nas alças auriculares para identificar a composição dos materiais. A Figura 7 exibe os espectros de FTIR referentes à alça auricular (ES), à superfície da máscara (MF), ao elástico interno presente na alça (internal elastic) e ao arame moldável localizado na região nasal (wire cover), respectivamente.

Figura 7 – Espectro de FTIR-ATR das as curvas: ES, MF, “*elastic band*” da alça auricular e “*wire cover*” material que reveste o arame moldável da máscara.



FONTE: Autoria própria

Analisando o FTIR do “*ear strap*” (ES), foi possível identificar absorções características em 1408, 1237 e 1090  $\text{cm}^{-1}$  do estiramento da ligação C-O-C. A banda em 1709  $\text{cm}^{-1}$  indica a vibração do alongamento do grupo carbonila (CO) de ésteres insaturados, enquanto a banda em 2967  $\text{cm}^{-1}$  é correspondente às vibrações de alargamento da ligação C=C e C-H do  $\text{CH}_2$ , respectivamente. Sugere-se que o material presente na alça auricular da máscara descartável é um poliéster aromático (Ali *et al.* 2022).

Em relação ao “*mask face*” (MF), verificou-se a presença de absorção característica em 837  $\text{cm}^{-1}$ , relativa a banda de estiramento de C- $\text{CH}_3$ . As bandas de absorção em 970 e 1170  $\text{cm}^{-1}$  são atribuídas a vibrações oscilantes de - $\text{CH}_3$ . A vibração simétrica de - $\text{CH}_3$  foi detectada em 1376  $\text{cm}^{-1}$  e a banda de absorção em 2955  $\text{cm}^{-1}$  está relacionada à vibração de estiramento assimétrico de - $\text{CH}_3$ . (Gopanna *et al.* 2019). Dessa maneira, sugere-se que o material presente na “*mask face*” seja um polipropileno.

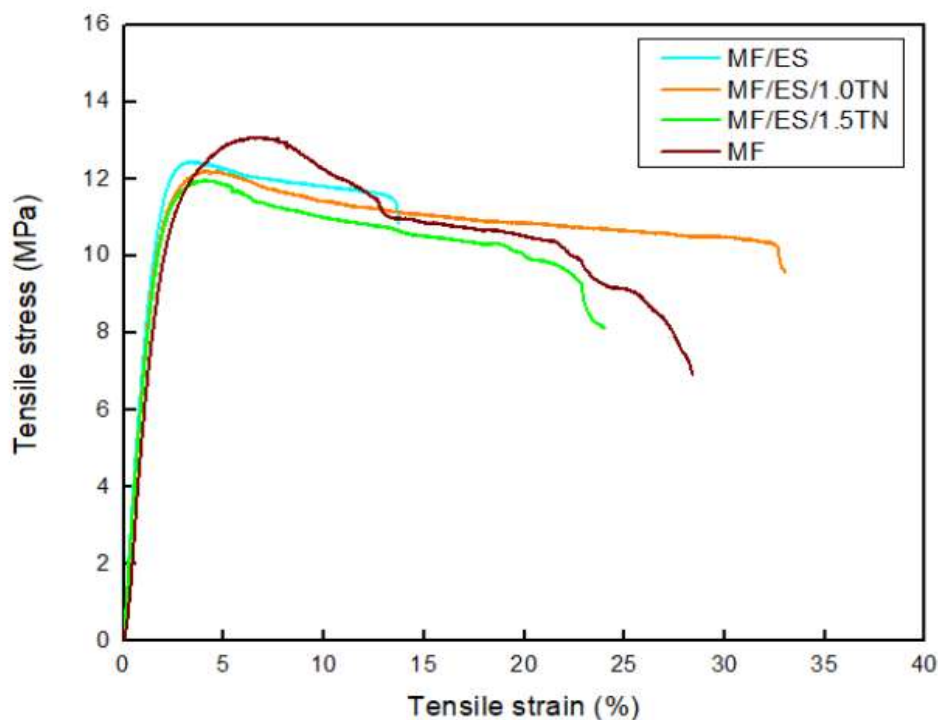
O espectro “*elastic band*” é relativo ao material interno na alça auricular. Neste caso, observou-se a presença de absorções características a 3320  $\text{cm}^{-1}$ , relativa ao nitrogênio dissustituído (que possui dois de seus hidrogênios substituídos). Logo, em geral, para uretanos secundários, *i.e.*, quando há dois átomos de carbonos e um átomo de hidrogênio ligados ao átomo de nitrogênio, esse pico desloca-se de 3340  $\text{cm}^{-1}$  para 3250  $\text{cm}^{-1}$ . Dessa maneira, caracteriza-se o elástico interno à alça auricular como um poliuretano secundário (Williams *et al.* 2020).

Em relação ao *wire cover* (WC), destaca-se bandas a  $2842\text{ cm}^{-1}$  que representa o estiramento simétrico do  $\text{CH}_2$ ,  $2914\text{ cm}^{-1}$  indica ser o estiramento assimétrico de  $\text{CH}_2$ ,  $1464\text{ cm}^{-1}$  refere-se à deformação assimétrica de  $\text{CH}_3$  e estiramento simétrico do  $\text{CH}_2$  e,  $718\text{ cm}^{-1}$  atribuído à deformação angular fora do plano de  $\text{CH}_2$ . A presença de tais bandas sugere que o material que reveste o arame moldável é um polietileno (Pessanha et al. 2011)

Após a caracterização das máscaras descartáveis, o processo de reciclagem foi realizado utilizando um misturador termocinético. A reciclagem termomecânica resultou na obtenção de blendas ternárias compostas por PP/PET/PU incorporadas com  $\text{TiO}_2$  na fase anatase. Com o objetivo de aumentar a funcionalidade desse material reciclado, foi adicionado um agente de acoplamento organometálico baseado em titanato neoalcóxi.

Após a adição de diferentes concentrações do aditivo, submetem as amostras a ensaios térmicos como DSC e TGA, além de ensaio reológico e por fim, ensaio mecânico, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Curvas de tensão em função da deformação representativas referentes aos ensaios mecânicos para as amostras.



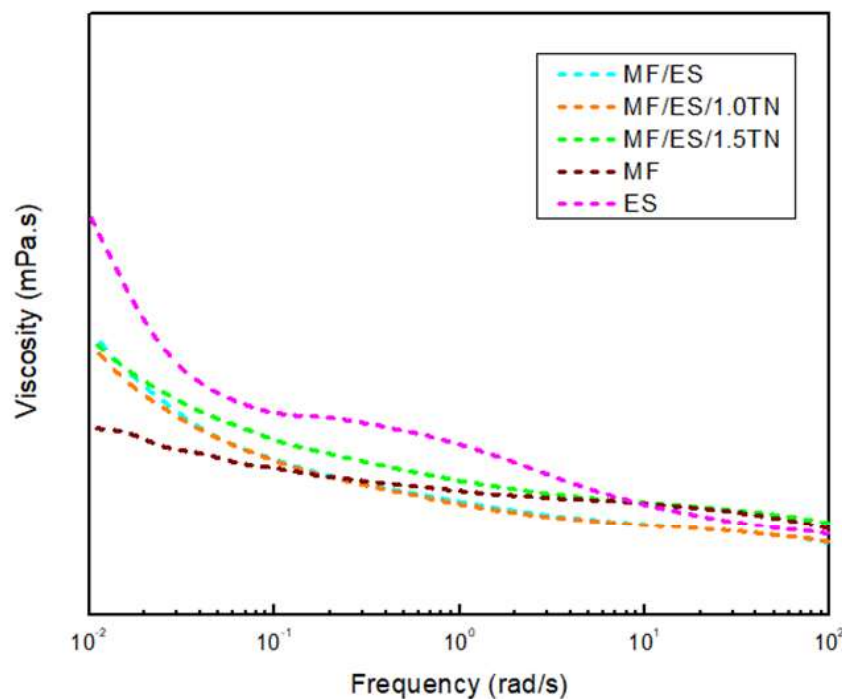
FONTE: A autoria própria.

No que diz respeito ao comportamento mecânico, o resultado mais significativo foi o aumento no alongamento na ruptura proporcionado pela adição do aditivo, esse aprimoramento pode ser atribuído ao efeito compatibilizante atuando de forma a facilitar a interação entre as fases presentes, fortalecendo a interface do sistema. Essa melhoria na

interface é essencial para uma eficiente transferência de tensões entre as fases. A ausência dessa interação resulta na formação de microvazios nas interfaces, que podem originar trincas e favorecer sua propagação. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que a composição com 1% de aditivo é a que melhor otimiza o comportamento mecânico do material reciclado na faixa de análise considerada (Tomás 2000).

Os resultados de viscosidade complexa em função da frequência angular estão dispostos na Figura 9. O ensaio de *frequency sweep* foi feito em uma faixa de frequência angular de 0,01-100 rad/s e deformação de 3% dentro do regime de viscoelasticidade.

Figura 9 - Viscosidade complexa versus frequência para as diferentes amostras estudadas.



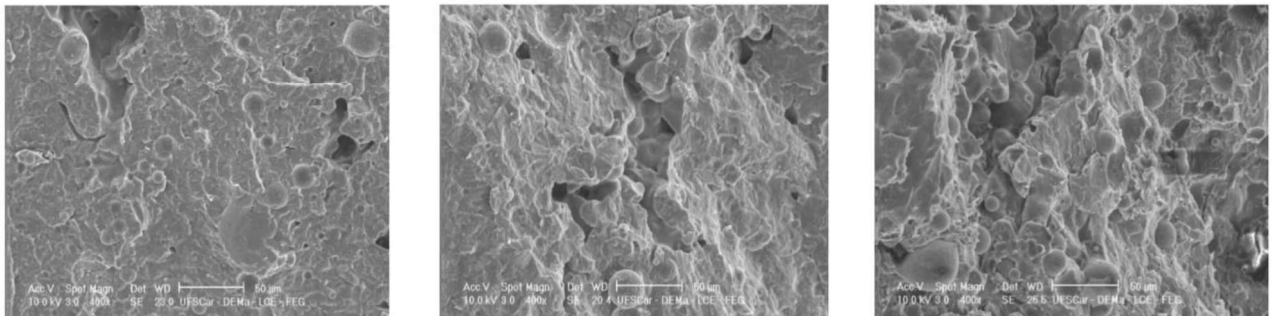
FONTE: A autoria própria.

Pelos resultados obtidos para as blendas poliméricas, observa-se uma diminuição da viscosidade complexa com o aumento da frequência angular, assim como observado para os materiais puros. Para a blenda sem aditivo, as composições com teores de 0 e com 1% do organometálico apresentaram valores de viscosidade complexo idênticos, indicando que a blenda com 1% teor de aditivo não apresentou mudanças nestas propriedades ao comparar com a blenda sem aditivo. Já a blenda com teor de 1,5% de aditivo apresentou maior viscosidade quando comparada com a blenda com 0% e 1% de aditivo. Esse resultado pode ser associado ao maior entrelaçamento molecular devido a presença de agente compatibilizante ou pelo efeito de “repolimerização” assistida por catálise metaloceno *in-situ* promovida pelo aditivo organometálico.

Com a reciclagem de somente PP(MF), sem a mistura com o PET(ES) e sem a adição de aditivo, a viscosidade do material é menor que a viscosidade da amostra de MF com ES e com 1,5% do agente compatibilizante. Com o aumento da viscosidade na amostra 1,5 % de aditivo é possível inferir que houve algum indicativo de reconexão de cadeias e, dessa maneira, permitindo aumento de massa molar, o que impacta no aumento da viscosidade.

A Figura 10 mostra as micrografias de MEV da superfície crio-fraturada da blenda sem e com compatibilizante e em diferentes concentrações. Em todas as amostras observou-se a separação do PET na forma de gotas e o PP como fase contínua.

Figura 10 – Micrografias das blends: sem compatibilizante, com 1,0 e com 1,5% em peso de compatibilizante, respectivamente.



FONTE: Autoria própria

Com a inserção de 1 % do organometálico, ocorre diminuição da fase minoritária de PET, além de uma melhoria na dispersão e uniformidade da fase dispersa (Maroufkhani 2014). Tal resultado facilita o disparo de mecanismos de tenacificação o que explica o seu melhor comportamento mecânico no ensaio de tração. No entanto, quanto mais se adiciona o organometálico, as gotas ficam maiores apresentando uma morfologia mais grosseira com 1,5 %, referindo-se a uma estrutura na qual as fases poliméricas de PET apresentam domínios de tamanho maior e, por consequência, prejudicando seu comportamento mecânico.

## 2.4 Proposta de Redesign das Máscaras para Melhor Reciclagem

A reciclagem desponta como uma solução eficaz para combater a poluição plástica causada pelo descarte inadequado de máscaras cirúrgicas. Entretanto, o *redesign* desses produtos pode ser tão eficiente quanto a reciclagem no enfrentamento desse problema.

Entre as alternativas propostas estão o uso de peças plásticas totalmente recicláveis

ou compostáveis. O redesenho de máscaras é uma estratégia necessária não apenas para diminuir os níveis de poluição, mas também para reduzir, de forma segura, os custos associados aos plásticos. Além disso, é essencial conscientizar o público sobre os impactos negativos da poluição plástica no meio ambiente, promovendo uma participação contínua nos esforços de reciclagem.

Uma alternativa sustentável e moderna para mitigar os impactos ambientais gerados até então, é a produção de máscaras biodegradáveis, que apresentam um potencial de reduzir significativamente os resíduos plásticos acumulados. Substituir o polipropileno, material presente nas máscaras convencionais, por opções biodegradáveis e orgânicas é uma solução viável. Tais materiais devem apresentar propriedades físicas, mecânicas e químicas equivalentes, incluindo leveza, alta resistência à tração, baixo custo, sustentabilidade ecológica e elevado potencial de biodegradação (Glukhikhkh 2020; Samper 2018; Siracusa e Blanco 2020; Selvaranjan 2021).

Já existe a produção de máscaras biodegradáveis feitas a partir de materiais como resíduos de cana-de-açúcar (Layt 2020), borra de café (Ho 2020) e fibras de cânhamo (Staff 2020). Essas máscaras se destacam por sua elevada eficiência antibacteriana (99,99%) e alta capacidade de filtração. No entanto, pesquisas ainda estão em andamento para melhorar suas especificações técnicas e adequá-las aos padrões rigorosos exigidos para máscaras médicas (Choi 2021; Santarsiero 2020a; Santarsiero 2020b). Para atingir esses padrões, a produção de máscaras biodegradáveis precisa garantir características como resistência à água, elasticidade e eficiência de filtração. Além disso, o uso de plásticos biodegradáveis pode reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>, entre 30% e 70%, em comparação com os plásticos convencionais (Lackner 2015; Selvaranjan 2021).

Os polímeros biodegradáveis utilizados na fabricação dessas máscaras podem ser obtidos a partir de diversas fontes. Entre elas estão biomassa derivada de agroindústrias, que inclui polissacarídeos (como amidos e lignocelulose), proteínas, lipídios e até microrganismos. Fibras naturais, como cacto, banana, abacate, lótus, sisal, palha, cânhamo, bambu, milho, café e cana-de-açúcar, também demonstram potencial para atender às exigências técnicas requeridas na produção de máscaras biodegradáveis (Luhar 2020; Ramesh 2017; Yan 2016; Selvaranjan 2021).

Embora os bioplásticos usados em máscaras biodegradáveis ejam promovidos como uma solução sustentável, ainda existem dúvidas sobre sua biodegradabilidade completa, além de várias limitações que dificultam sua aplicação prática. Por exemplo, materiais como o poli(ácido láctico) (PLA) dependem de condições específicas, como encontrados em

compostadores industriais, para que a biodegradação ocorra de forma eficiente (Vanapalli 2021; Selvaranjan 2021).

Por esse motivo, torna-se crucial o investimento em infraestrutura adequada para a gestão de biorresíduos. No entanto, isso pode gerar custos elevados, representando um desafio adicional para a implementação dessa alternativa. Assim, estudos mais aprofundados são necessários para avaliar a eficiência, o impacto ambiental e a durabilidade das máscaras biodegradáveis, garantindo sua previsão prática e sustentável (Selvaranjan 2021). Desse modo, o *redesign* da máscara facial descartável feita de tecido não tecido para uma máscara feita por bioplástico ou biodegradável pode não ser a melhor alternativa.

Quando se trata de equipamentos de proteção individual (EPIs) adicionais, é essencial adotar estratégias para garantir o descarte correto e a esterilização antes da reciclagem. Uma abordagem eficiente seria a fabricação de máscaras, utilizando exclusivamente polipropileno, o principal material presente nelas atualmente. Isso facilitaria o processo de reciclagem, já que o material poderia ser reaproveitado e reciclado de forma mais simples e aplicado em novos produtos. O polipropileno reciclado, por sua vez, poderia ser misturado com material virgem para especificações diversas, excluindo a reutilização direta na produção de máscaras específicas. Dessa forma, é possível manter o objetivo principal da máscara, que é proteger o usuário e indivíduos ao seu redor, já que a eficiência vem da confecção com tecido não tecido de PP, e também tornaria o processo de reciclagem pós consumo mais viável e aplicável, por se tratar de um produto constituído por um único material.

### 3. Considerações Finais

Em suma, a crescente demanda por máscaras faciais durante a pandemia de COVID-19 revelou não apenas sua importância como equipamento de proteção individual, mas também o impacto ambiental associado ao seu uso e descarte. Máscaras descartáveis, predominantemente feitas de PP, oferecem benefícios funcionais, como leveza, respirabilidade e eficiência de filtração. No entanto, sua natureza não biodegradável e o descarte inadequado geraram uma nova onda de poluição ambiental, agravada pela fragmentação em microplásticos e pelo acúmulo em ecossistemas terrestres e aquáticos.

Soluções como a reciclagem mecânica somado ao *redesign* de máscaras apresentam-se como caminho viável para mitigar esses impactos. Uma vez que a

constituição da máscara mostra-se ser de extrema complexidade, apenas a reciclagem mecânica pode não ser suficiente, mas com a proposta de *redesign*, possivelmente pode ser a solução mais plausível para a problemática atual. Sendo assim, uma máscara facial descartável feita com sua estrutura completamente feita de polipropileno, pode ser a solução ideal para essa questão, pois ainda assim haveria a proteção necessária para os indivíduos que a usam, e também seria possível ter uma reciclagem mecânica pós consumo melhor estruturada e executada, uma vez que se trataria de único polímero.

A conclusão deste estudo destaca a importância de integrar estratégias de reciclagem, inovação tecnológica e políticas públicas que incentivem o uso de materiais sustentáveis e recicláveis. A transição para uma economia circular, com ênfase na reutilização e redução de resíduos, é fundamental para enfrentar os desafios ambientais gerados pelo aumento do uso de máscaras descartáveis e outros EPIs durante emergências de saúde pública.

## Referências Bibliográficas

BEHERA, Bikash Chandra. **Challenges in handling COVID-19 waste and its management mechanism: A review**. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, [s.l.], v. 15, p. 100432, may 2021. DOI: 10.1016/j.enmm.2021.100432.

PATRICIO SILVA et al. **Decontamination of microplastic-contaminated water by developing green adsorbents**. *Chemical Engineering Journal*, [s.l.], v. 399, p. 126683, 2020. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126683.

AKHBARIZADEH, S.; DOBARADARAN, I.; NABIPOUR, M.; TANGESTANI, D.; ABEDI, F.; JAVANFEKR, F.; JEDDI, A.; ZENDEHBOODI, A. **Abandoned Covid-19 personal protective equipment along the Bushehr shores, the Persian Gulf: an emerging source of secondary microplastics in coastlines**. *Marine Pollution Bulletin*, v. 168, p. 112386, 2021. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112386.

ARDUSSO, M.; FORERO-LOPÉZ, A. D.; BUZZI, N. S.; SPETTER, C. V.; FERNÁNDEZ-SEVERINI, M. D. **COVID-19 pandemic repercussions on plastic and antiviral polymeric textile causing pollution on beaches and coasts of South America**. *Science of the Total Environment*, v. 763, p. 144365, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144365.

PRATA, J. C.; SILVA, A. L. P.; WALKER, T. R.; DUARTE, A. C.; ROCHA-SANTOS, T. **COVID-19 pandemic repercussions on the use and management of plastics**. *Environmental Science & Technology*, v. 54, p. 7760-7765, 2020. DOI: 10.1021/acs.est.0c02178.

HIEMSTRA, A.-F.; RAMBONNET, L.; GRAVENDEEL, B.; SCHILTHUIZEN, M. **The effects of COVID-19 litter on animal life**. *Animal Biology*, v. 1, p. 1-17, 2021. DOI: 10.1163/15707563-bja10052.

SULLIVAN, G. L.; DELGADO-GALLARDO, J.; WATSON, T. M.; SARP, S. **An investigation into the leaching of micro and nano particles and chemical pollutants from disposable face masks - linked to the COVID-19 pandemic**. *Water Research*, v. 196, p. 117033, 2021. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117033.

ARAGAW, T. A. **Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario.** *Marine Pollution Bulletin*, v. 159, p. 111517, 2020. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111517.

DE-LA-TORRE, G. E.; ARAGAW, T. A. **What we need to know about PPE associated with the COVID-19 pandemic in the marine environment.** *Marine Pollution Bulletin*, v. 163, p. 111879, 2021. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111879.

FADARE, O. O.; OKOFFO, E. D. **Covid-19 face masks: a potential source of microplastic fibers in the environment.** *Science of the Total Environment*, v. 737, p. 140279, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140279.

TORRES, Fernando G.; DE-LA-TORRE, Gabriel E. **Face mask waste generation and management during the COVID-19 pandemic: An overview and the Peruvian case.** *Science of the Total Environment*, v. 795, p. 147628, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147628.

BOROUJENI, M.; SABERIAN, M.; LI, J. **Environmental impacts of COVID-19 on Victoria, Australia, witnessed two waves of Coronavirus.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 1-10, 2021. DOI: 10.1007/s11356-021-12556-y.

SANGKHAM, S. **Face mask and medical waste disposal during the novel COVID-19 pandemic in Asia.** *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 2, p. 100052, 2020. DOI: 10.1016/j.cscee.2020.100052.

ARAGAW, Tadele Assefa. **Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario.** *Marine Pollution Bulletin*, v. 159, p. 111517, 2020. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111517.

SCHMIDT, N.; THIBAUT, D.; GALGANI, F.; PALUSELLI, A.; SEMPERÉ, R. **Occurrence of microplastics in surface waters of the Gulf of Lion (NW Mediterranean Sea).** *Progress in Oceanography*, v. 163, p. 214-220, 2018. DOI: 10.1016/j.pocean.2017.11.010.

SEOANE, E. A. et al. **Tuneable and biodegradable poly(ester amide)s for disposable facemasks.** *Macromolecular Materials and Engineering*, 2023. DOI: 10.1002/mame.202300375.

KLIMEK, L.; HUPPERTZ, T.; ALALI, A.; SPIELHAUPTER, M.; HÖRMANN, K.; MATTHIAS, C.; et al. **A new form of irritant rhinitis to filtering facepiece particle (FFP) masks (FFP2/N95/KN95 respirators) during COVID-19 pandemic.** *World Allergy Organization Journal*, v. 13, p. 100474, 2020. DOI: 10.1016/j.waojou.2020.100474.

PRATA, J. C.; SILVA, A. L. P.; WALKER, T. R.; DUARTE, A. C.; ROCHA-SANTOS, T. **COVID-19 pandemic repercussions on the use and management of plastics.** *Environmental Science & Technology*, v. 54, p. 7760-7765, 2020. DOI: 10.1021/acs.est.0c02178.

AWARI. **Redesign de Produto: Atualizando e Melhorando seu Produto**, 2023. Disponível em: <https://awari.com.br/redesign-de-produto-atualizando-e-melhorando-seu-produto/>. Acesso em: 16 fev. 2025.

POLI BALBINO. **Design sustentável: como integrar termoplásticos reciclados em produtos sustentáveis.** Disponível em: <https://www.polibalbino.com.br/blog/design-sustentavel-como-integrar-termoplasticos-reciclados-em-produtos-sustentaveis>. Acesso em: 16 fev. 2025.

CHEN, X.; HUANG, G.; LI, Y.; AN, C.; FENG, R.; WU, Y.; et al. **Functional PVDF ultrafiltration membrane for Tetrabromobisphenol-A (TBBPA) removal with high water recovery.** *Water Research*, v. 181, p. 115952,

2020. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115952.

SULLIVAN, G. L.; DELGADO-GALLARDO, J.; WATSON, T. M.; SARP, S. **An investigation into the leaching of micro and nano particles and chemical pollutants from disposable face masks - linked to the COVID-19 pandemic.** *Water Research*, v. 196, p. 117033, 2021. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117033.

LYU, Linxiang; BAGCHI, Monisha; MARKOGLou, Nektaria; AN, Chunjiang; PENG, He; BI, Huifang; YANG, Xiaohan; SUN, Huijuan. **Towards environmentally sustainable management: A review on the generation, degradation, and recycling of polypropylene face mask waste.** *Journal of Hazardous Materials*, v. X, p. 132566, 2023. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132566.

PARK, S.; JAYARAMAN, S. **From containment to harm reduction from SARS-CoV-2: a fabric mask for enhanced effectiveness, comfort, and compliance.** *Journal of The Textile Institute*, v. 112, p. 1144-1158, 2021. DOI: 10.1080/00405000.2020.1805971.

KREY, Patrícia Fernanda. **Obtenção de polipropileno modificado com metacrilato de glicidila e anidrido maleico e sua aplicação na compatibilização de blendas de polipropileno/poli (tereftalato de etileno).** 2002. 123 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CANEVAROLO Jr., S. V. Comportamento térmico dos polímeros. In: *Ciência dos Polímeros*. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006. p. 149-162.

ODIAN, G. **Estereoquímica da polimerização.** In: *Principles of polymerization*. 4. ed. New York: John Wiley, 2004. p. 696.

VERCELINO, R. M. et al. **Ensaio para avaliação de embalagens plásticas rígidas.** Campinas: CETEA/ITAL, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria da Agricultura e Abastecimento, Instituto de Tecnologia de Alimentos, p. 9-10, 15-16, 1998.

BORSIG, E. *J.M.S - Pure and Applied Chemistry*, v. A36, n. 11, p. 1699-1715, 1999.

McLOUGHLIN, K. M. et al. ANTEC'97, **Polymer Modifiers and Additives Division, Polyolefins I – Polypropylene.** Toronto: Society of Plastics Engineers, 1997. p. 733.

NAQVI, M. K.; CHOUDHARY, M. S. *J.M.S - Rev. Macromol. Chem. Phys.*, 1996, v. C36, n. 3, p. 601-629.

FRITZ, H.-G.; CAI, Q.; BOLZ, U. **Kunststoffe German Plastics**, 1993, v. 83, n. 6, p. 8-10.

FIORIO, Rudinei. **Síntese e caracterização de poliuretano termoplástico contendo POSS via extrusão reativa.** 2011. 2 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Maastricht University, Maastricht, 2011. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/344553994\\_Sintese\\_e\\_caracterizacao\\_de\\_poliuretano\\_termoplastico\\_contendo\\_POSS\\_via\\_extrusao\\_reativa](https://www.researchgate.net/publication/344553994_Sintese_e_caracterizacao_de_poliuretano_termoplastico_contendo_POSS_via_extrusao_reativa). Acesso em: 24 jan. 2025.

CALDEIRA, Caren Barbosa. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas, térmicas e da morfologia de blendas de PET reciclado/PP e PET reciclado/copolímero PP-EP compatibilizadas ou não.** 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2012.

COUTINHO, Fernanda M. B.; MELLO, Ivana L.; SANTA MARIA, Luiz C. de. **Poliétileno: principais tipos, propriedades e aplicações.** *Polímeros*, v. 13, n. 1, p. 29-37, jan. 2003. DOI: 10.1590/S0104-

14282003000100005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005>. Acesso em: 24 jan. 2025.

GOBIKANNAN, T.; PAWAR, S. J.; KUMAR, S. K. S.; CHAVHAN, Md. V.; NAVINBHAI, A. H.; PRAKASH, C. **Importance of antiviral and antibacterial face mask used in pandemics: an overview.** *Journal of Natural Fibers*, v. 20, p. 2160407, 2023. DOI: 10.1080/15440478.2022.2160407.

ZHAO, C.; MARK, L. H.; KIM, S.; CHANG, E.; PARK, C. B.; LEE, P. C. **Recent progress in micro-/nano-fibrillar reinforced polymeric composite foams.** *Polymer Engineering & Science*, v. 61, p. 926-941, 2021. DOI: 10.1002/pen.25643.

THADEPALLI, S. **Review of multifarious applications of polymers in medical and health care textiles.** *Materials Today: Proceedings*, v. 55, p. 330-336, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.07.513.

MOHANA, A. A.; ISLAM, M. M.; RAHMAN, M.; PRAMANIK, S. K.; HAQUE, N.; GAO, L.; et al. **Generation and consequence of nano/microplastics from medical waste and household plastic during the COVID-19 pandemic.** *Chemosphere*, v. 311, p. 137014, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137014.

LYU, Linxiang; BAGCHI, Monisha; MARKOGLU, Nektaria; AN, Chunjiang; PENG, He; BI, Huifang; YANG, Xiaohan; SUN, Huijuan. **Towards environmentally sustainable management: A review on the generation, degradation, and recycling of polypropylene face mask waste.** *Journal of Hazardous Materials*, v. X, p. 132566, 2023. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132566.

GUSELNIKOVA, O.; SEMYONOV, O.; KIRGINA, M.; IVANOV, A.; ZINOVIEV, A.; POSTNIKOV, P. **Polymer waste surgical masks decorated by superhydrophobic metal-organic frameworks towards oil spills clean-up.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, p. 107105, 2022. DOI: 10.1016/j.jece.2021.107105.

MADERUELO-SANZ, R.; ACEDO-FUENTES, P.; GARCÍA-COBOS, F. J.; SÁNCHEZ-DELGADO, F. J.; MOTA-LÓPEZ, M. I.; MENESES-RODRÍGUEZ, J. M. **The recycling of surgical face masks as sound porous absorbers: Preliminary evaluation.** *Science of The Total Environment*, v. 786, p. 147461, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147461.

CUI, J.; QI, M.; ZHANG, Z.; GAO, S.; XU, N.; WANG, X.; et al. **Disposal and resource utilization of waste masks: a review.** *Environmental Science and Pollution Research*, 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-25353-6.

RAMAN, A.; JAYAN, J. S.; DEERAJ, B. D. S.; SARITHA, A.; JOSEPH, K. **Electrospun nanofibers as effective superhydrophobic surfaces: a brief review.** *Surface and Interfaces*, v. 24, p. 101140, 2021. DOI: 10.1016/j.surfin.2021.101140.

AHMAD, J.; ZHOU, Z. **Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete: a review.** *Construction and Building Materials*, v. 333, p. 127353, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127353.

CHELLAMANI, K. A. A. **Water quality analysis using water quality index in the Vellar River, Tamilnadu, India.** 2013. Disponível em: <http://www.jairjp.com/NOVEMBER%202013/02%20CHELLAMANI%201.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2025.

NAYAK, R.; PADHYE, R.; KYRATZIS, I. L.; TRUONG, Y. B.; ARNOLD, L. **Recent advances in nanofibre fabrication techniques.** *Textile Research Journal*, v. 82, n. 2, p. 129-147, 2012.

JAYARAMAN, K.; KOTAKI, M.; ZHANG, M.; RAMAKRISHNA, S. **Recent advances in polymer nanofibers.** *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 4, n. 1-2, p. 52-65, 2004.

- MCCARTHY, B. J. *Textiles for hygiene and infection control*. Woodhead Publishing Ltd., 2011. p. 125-135.
- LUNENSCHLOSS, J.; ALBRECHT, W. *Non-woven bonded fabric*. Ellis Horwood Limited, 1985. p. 396-397.
- MALKAN, S. R. **An overview of spunbonding and meltblowing technologies**. *Tappi Journal*, v. 78, p. 185-190, 1995.
- TURBAK, A. F. *Nonwovens: Theory, Process, Performance, and Testing*. Atlanta: TAPPI PRESS, 1993.
- MCCULLOCH, J. G. **The history of the development of melt blowing technology**. *International Nonwovens Journal*, 1999.
- JIRSÁK, O.; WADSWORTH, L. C. *Nonwoven Textiles*. Durham, NC: Carolina Academic Press, 1999.
- ČERVÍK, R. *Netkané filtrační textilie pro čištění kapalin*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2020.
- DUTTON, K. C. **Overview and analysis of the meltblown process and parameters**. *Journal of Textile and Apparel Technology and Management*, v. 6, 2009.
- FARZANEH, Sedigheh; SHIRINBAYAN, Mohammadali. **Processing and Quality Control of Masks: A Review**. *Polymers*, v. 14, n. 2, p. 291, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14020291>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.
- DRABEK, J.; ZATLOUKAL, M. **Meltblown technology for production of polymeric microfibers/nanofibers: A review**. *Physics of Fluids*, v. 31, p. 91301, 2019.
- WILSON, A. **The formation of dry, wet, spunlaid and other types of nonwovens**. *Applied Nonwovens Technology in Textiles*, p. 3-17, 2010.
- MIDHA, V.K.; DAKURI, A. **Spun bonding technology and fabric properties: A review**. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, v. 1, p. 1-9, 2017.
- LIPP, A.; EDWARDS, P. **Disposable surgical face masks for preventing surgical wound infection in clean surgery**. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, Issue 1, 2002. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14651858.CD002929/pdf>. Acesso em: 05 de janeiro de 2025.
- KOTHARI, V.K. *Progress in textiles: Science and Technology Technical textiles: Technology, developments and applications*. Vol. 3. India: IAFL Publications, 2008. p. 197-230.
- CHELLAMANI, K.P.; VEERASUBRAMANIAN, D.; VIGNESH BALAJI, R.S. **Surgical Face Masks: Manufacturing Methods and Classification**. *Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)*, v. 2, n. 6, nov. 2013. Disponível em: <http://www.jairjp.com/NOVEMBER%202013/02%20CHELLAMANI%201.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2025.
- SANGKHAM, S. **Face mask and medical waste disposal during the novel COVID-19 pandemic in Asia**. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 2, 2020, Article 100052.
- SELVARANJAN, K.; NAVARATNAM, S.; RAJEEV, P.; RAVINTHERAKUMARAN, N. **Environmental challenges induced by extensive use of face masks during COVID-19: A review and potential solutions**. *Environmental Challenges*, v. 3, 2021, Article 100039. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100039>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.
- LIEBSCH, T. **The rise of the face mask: What's the environmental impact of 17 million N95 masks?**

*Ecochain*, 2020. Disponível em: [www.ecochain.com](http://www.ecochain.com). Acesso em: 5 janeiro de 2025.

KLEMEŠ, J. J.; FAN, Y. V.; JIANG, P. **The energy and environmental footprints of COVID-19 fighting measures – PPE, disinfection, supply chains.** *Energy*, v. 211, 2020, Article 118701.

AYSE, L. A.; ESTHER, A.-D.; TERESA, D. A.; MARIA, B.; MIGUEL, C. A.; CHARNETT, C.; KIMBERLEY, C.; DRAGANA, D.; HELEN, H.; PAOLA, L.; CHAO, L.; FRANCESCA, M.; SUSAN, M.; MARK, M.; DANIELLE, P.; JOHN, W. **The environmental dangers of employing single-use face masks as part of a COVID-19 exit strategy.** *UCL Open: Environment Preprint*, 2020.

WEBB, H. K.; ARNOTT, J.; CRAWFORD, R. J.; IVANOVA, E. P. **Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate).** *Polymers*, v. 5, 2013.

BOYLE, L. **Bird dies after getting tangled in coronavirus face mask.** *Independent New York*, 2020. Disponível em: <https://www.independent.co.uk>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

YANG, Y.; LIU, W.; ZHANG, Z.; GROSSART, H.-P.; GADD, G.M. **Microplastics provide new microbial niches in aquatic environments.** *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 104, p. 6501-6511, 2020.

RAY, Saikat Sinha; LEE, Hyung Kae; HUYEN, Dao Thi Thanh; CHEN, Shiao-Shing; KWON, Young-Nam. **Microplastics waste in environment: A perspective on recycling issues from PPE kits and face masks during the COVID-19 pandemic.** *Environmental Technology & Innovation*, v. 26, p. 102290, may 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102290>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

BLECK, D.; WETTBERG, W. **Waste collection in developing countries—Tackling occupational safety and health hazards at their source.** *Waste Management*, v. 32, p. 2009–2017, 2012.

KALINA, M.; TILLEY, E. **This is our next problem: Cleaning up from the COVID-19 response.** *Waste Management*, v. 108, p. 202–205, 2020.

CHEN, R.; ZHANG, D.; XU, X.; YUAN, Y. **Pyrolysis characteristics, kinetics, thermodynamics and volatile products of waste medical surgical mask rope by thermogravimetry and online thermogravimetry-Fourier transform infrared-mass spectrometry analysis.** *Fuel*, v. 295, p. 120632, 2021.

IDREES, Maria; AKBAR, Arslan; MOHAMED, Abdeliazim Mustafa; FATHI, Dina; SAEED, Farhan. **Recycling of waste facial masks as a construction material, a step towards sustainability.** *Materials*, v. 15, n. 5, p. 1810, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15051810>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

ASTM. *ASTM F2100 - Standard specification for performance of materials used in medical face masks.* USA, 2007.

BS EN ISO 15223-1. *Medical devices. Symbols to be used with medical device labels, labelling and information to be supplied. General requirements.* BSI, 2016.

AKBER, A. S.; KHALIL, A. B.; ARSLAN, M. **Extensive use of face masks during COVID-19 pandemic: (micro-)plastic pollution and potential health concerns in the Arabian Peninsula.** *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 27, p. 3181-3186, 2020.

PARIJA, S.; MISHRA, D.; LEUNG, C. **Preliminary results of concrete with shredded disposable face masks.** In: PROCEEDINGS OF THE 35TH INDIAN ENGINEERING CONGRESS (IEC)—Engineering for Self Reliance and Sustainable Goals, Kolkata, India, 18–20 Dec. 2020.

SABERIAN, M.; LI, J.; KILMARTIN-LYNCH, S.; BOROUJENI, M. **Repurposing of COVID-19 single-use face masks for pavements base/subbase.** *Science of the Total Environment*, v. 769, p. 145527, 2021.

CRESPO, Cristina; IBARZ, Gemma; SÁENZ, Carlos; GONZALEZ, Pablo; ROCHE, Sandra. **Study of recycling potential of FFP2 face masks and characterization of the plastic mix-material obtained: A way of reducing waste in times of COVID-19.** *Environmental Chemistry Letters*, v. 12, p. 6423-6432, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01476-0>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

FANG, C.; NIE, L.; LIU, S.; YU, R.; AN, N.; LI, S. **Characterization of polypropylene-polyethylene blends made of waste materials with compatibilizer and nano-filler.** *Composites Part B: Engineering*, v. 55, p. 498-505, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.046>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

CLEMONS, C. **Elastomer modified polypropylene-polyethylene blends as matrices for wood flour-plastic composites.** *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 41, p. 1559-1569, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.07.002>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

BATTEGAZZORE, Daniele; CRAVERO, Fulvia; FRACHE, Alberto. **Is it possible to mechanical recycle the materials of the disposable filtering masks?** *Polímeros*, v. 12, n. 11, p. 2726, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym12112726>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

UTRACKI, L. A. **Polymer blends handbook**. Vol. 1. Netherlands: Kluwer Academic, 2002. p. 295-296.

SERLING, L. H. **Introduction to physical polymer science**. 4. ed. Pennsylvania, USA: Wiley, 2006. p. 692.

WANG, Y. et al. **Dependence of impact strength on the fracture propagation directions in dynamic packing injection molded PP/EPDM blends.** *Polymer*, v. 44, p. 4261-4271, jul. 2003.

KIM, Dukjoon; KIM, Seong Kim. **Barrier property and morphology of polypropylene/polyamide blend film.** *Korean Journal of Chemical Engineering*, Coréia, v. [volume], p. 776-782, 2003.

DEMARQUETTE, N. R. Revisão e perspectivas. **Metalurgia e materiais.** *Revista Misturas Poliméricas*, São Paulo, p. 848-857, set. 1994.

SOUZA, A. M. C. *Generalidades*. In: \_\_\_\_\_. **Avaliação de tensão interfacial entre poliolefinas**. 2002. 2 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MACAÚBAS, P. H. P.; DEMARQUETTE, N. R. **Morphologies and interfacial tensions of immiscible polypropylene/polystyrene blends modified with triblock copolymers.** *Polymer*, v. 42, p. 2543-2554, 2001.

LEPERS, J. C.; FAVIS, B.; LACROIX, C. **The influence of partial emulsification on coalescence suppression and interfacial tension reduction in PP/PET blends.** *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, v. 37, p. 939-951, 1999.

LIN, Tzu-Hsien; CHEN, Chih-Chieh; HUANG, Sheng-Hsiu; KUO, Chung-Wen; LAI, Chane-Yu; LIN, Wen-Yinn. **Filter quality of electret masks in filtering 14.6–594 nm aerosol particles: Effects of five decontamination methods.** *PLOS ONE*, v. 12, n. 10, e0186217, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186217>.

ALI, Labeeb; KUTTIYATHIL, Mohamed Shafi; ALTARAWNEH, Mohammednoor. **Catalytic upgrading of the polymeric constituents in Covid-19 masks.** *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 1, p. 106978, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106978>.

GOPANNA, Aravinthan; MANDAPATI, Ramesh N.; THOMAS, Selvin P.; RAJAN, Krishnaprasad; CHAVALI, Murthy. **Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Raman spectroscopy and wide-angle X-ray scattering (WAXS) of polypropylene (PP)/cyclic olefin copolymer (COC) blends for qualitative and**

**quantitative analysis.** *Polymer Bulletin*, v. 76, n. 8, p. 4259–4274, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2599-0>.

Williams, J., & Putman, J. "Trace Element Analysis with Laser Ablation–Laser Ionization TOF-MS." *Spectroscopy*, vol. 35, no. 5, May 2020, pp. 9-17.

PESSANHA, Alexandre B.; ROCHA, Marisa C. G.; SILVA, Antonio H. M. F. T. da. **Introdução de ligações cruzadas no LLDPE através de processo de extrusão reativa de graftização do vinil-trimetóxi-silano (VTMS) na cadeia polimérica: efeito das condições de processamento e do sistema reacional.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 21, n. 1, p. 53-58, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/xg3vxWkYSvcXZpwby8wSrzk/abstract/?lang=pt>.

MÉLO, Tomás J. A. de; CARVALHO, Laura H.; CALUMBY, Ricardo B.; BRITO, Keila G. Q.; D'ALMEIDA, José R. M.; SPIETH, E. **Propriedades mecânicas e morfologia de uma blenda polimérica de PP/HIPS compatibilizada com SEBS.** *Polímeros*, v. 10, n. 2, jun. 2000. Seção Técnica. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282000000200010>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

MAROUFKHANI, M.; GOLSHAN EBRAHIMI, N. **Melt rheology of linear and long-chain branched polypropylene blends.** *Iranian Polymer Journal*, v. 24, p. 715–724, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13726-015-0357-9>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

GLUKHIKH, V. et al. **Plastics: physical-and-mechanical properties and biodegradable potential.** *Foods and Raw Materials*, v. 8, p. 149-154, 2020.

SAMPER, M. D. et al. **Interference of biodegradable plastics in the polypropylene recycling process.** *Materials*, v. 11, p. 1886, 2018.

SIRACUSA, V.; BLANCO, I. **Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications.** *Polymers*, v. 12, p. 1641, 2020.

LAYT, S. **Queensland researchers hit sweet spot with new mask material.** *The Age*, 2020. Disponível em: <https://www.theage.com.au>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

HO, S. **Vietnamese company creates world's first biodegradable coffee face mask.** *Green Queen*, 2020. Disponível em: <https://www.greenqueen.com.hk>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

STAFF, R. **From field to compost: French firm develops hemp face masks.** *Reuters*, 2020. Disponível em: <https://www.reuters.com>. Acesso em: 5 janeiro de 2025.

CHOI, S. et al. **Biodegradable, efficient, and breathable multi-use face mask filter.** *Advances in Science*, 2021. Article 2003155.

SANTARSIERO, A.; CIAMBELLI, P.; DONSI, G.; QUADRINI, F.; BRIANCESCO, R.; D'ALESSANDRO, D.; FARA, G.M. **Face masks. Technical, technological and functional characteristics and hygienic-sanitary aspects related to the use of filtering mask in the community.** *Annali di Igiene*, 2020, p. 32.

SANTARSIERO, A.; GIUSTINI, M.; QUADRINI, F.; D'ALESSANDRO, D.; FARA, G.M. **Effectiveness of face masks for the population.** *Annali di Igiene*, 2020.

LACKNER, M. **Bioplastics – biobased plastics as renewable and/or biodegradable alternatives to petroplastics.** In: OTHMER, K. (Ed.). *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 6. ed. Wiley, 2015.

LUHAR, S.; SUNTHARALINGAM, T.; NAVARATNAM, S.; LUHAR, I.; THAMBOO, J.; POLOGANATHAN, K.;

GATHEESHGAR, P. **Sustainable and renewable bio-based natural fibres and its application for 3D printed concrete: a review.** *Sustainability*, v. 12, p. 10485, 2020.

RAMESH, M.; PALANIKUMAR, K.; REDDY, K.H. **Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, p. 558-584, 2017.

YAN, L.; KASAL, B.; HUANG, L. **A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering.** *Composites Part B: Engineering*, v. 92, p. 94-132, 2016.

VANAPALLI, K. R.; SHARMA, H. B.; RANJAN, V. P.; SAMAL, B.; BHATTACHARYA, J.; DUBEY, B. K.; GOEL, S. **Challenges and strategies for effective plastic waste management during and post COVID-19 pandemic.** *Science of The Total Environment*, v. 750, p. 141514, 2021.

SINGH, R. K.; RUJ, B. **Plastic waste management and disposal techniques - Indian scenario.** *International Journal of Plastics Technology*, v. 19, p. 211–226, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12588-015-9120-5>.