POLIURETANOS SUSTENTÁVEIS NA PRODUÇÃO DE FILMES BIOPOLIMÉRICOS

Adrieli Medeiros[1], Thaís Cebaje[1], Natalia Borba [1], Débora Moreira [1],Catarina Motta de Moura [1,2] , Valéria Terra Crexi [1,2]

[1]Engenharia de Alimentos - Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Bagé,RS, Brasil.

(adrieligonsalves.aluno@unipampa.edu.br)

[2]Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais– Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Bagé, RS, Brasil.

Resumo: A crescente preocupação ambiental e o rigor das novas regulamentações impulsionaram o desenvolvimento de materiais provenientes de recursos renováveis para substituir os plásticos derivados do petróleo. Este trabalho apresenta uma revisão sobre a aplicação de poliuretanos sustentáveis na produção de filmes biopoliméricos. Essa abordagem se mostra uma alternativa viável que se alinha às exigências das ODS, conferindo aos filmes promissoras propriedades de flexibilidade e de barreira.

Palavras-chave: isocianatos; óleos vegetais; plásticos; polióis; recursos renováveis.

INTRODUÇÃO

Estima-se que mais de 450 milhões de toneladas de plástico sejam produzidas anualmente no mundo (GAIA, 2021; PLASTICS EUROPE, 2022). No entanto, a baixa taxa de reciclagem e a lenta degradação desses materiais no ambiente intensificaram preocupações ambientais, criando a necessidade de alternativas sustentáveis (Geyer et al., 2017; Pilapitiya e Ratnayake, 2024).

Essa problemática se insere diretamente nas diretrizes propostas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), que estabelecem metas globais para promover o desenvolvimento equilibrado e responsável ambientalmente. A questão da poluição plástica especificamente relaciona-se com o ODS 12 (Consumo de produção responsáveis), que incentiva práticas de produção mais limpas, redução do desperdício e uso eficiente dos recursos naturais e com o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ao considerar o impacto climático do ciclo de vida aos plásticos. Além disso, a promoção de soluções inovadoras e sustentáveis está alinhada como ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), especialmente no que se diz respeito ao desenvolvimento de materiais biodegradáveis, alternativas renováveis e tecnologias de baixo impacto ambiental (ONU, 2015).

Como alternativa a substituição dos plásticos convencionais os biopolímeros têm sido amplamente estudados para aplicação em filmes biopoliméricos, esses ganharam destaque a partir do início dos anos 2000, sendo um campo de pesquisa promissor, visto que, além de reduzirem o desperdício de plástico, também diminuem as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo de forma positiva para enfrentar a crise ambiental em que o mundo está inserido (CAI, 2022).

Os poliuretanos (PUs) sustentáveis, são biopolímeros obtidos da reação de ligações uretânicas entre um isocianato e um poliol de óleo vegetal, amplamente utilizados na produção de filmes, pois além de contribuírem para redução do impacto ambiental com o aproveitamento de matérias-primas renováveis, apresentam estabilidade térmica, flexibilidade e capacidade de ajuste das propriedades em função do tipo e da estrutura do poliol utilizado para conversão em poliuretano (Paraskar et al., 2021; Shi et al., 2024), desempenhado um papel crucial na indústria de bioplásticos.

Embora existam diversas revisões sobre bioplásticos, poucas abordam de forma integrada e atualizada

produção poliuretanos sustentáveis. O objetivo deste trabalho foi organizar essas informações e destacar os avanços tecnológicos por meio de uma revisão sobre poliuretanos de óleos vegetais e sua aplicação em filmes biopoliméricos.

MATERIAL E MÉTODOS

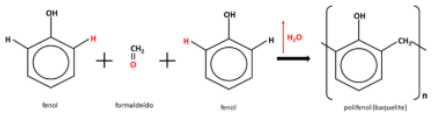
Para a elaboração da revisão literária foram consultados artigos científicos em bases de dados (LILACS, SCOPUS e WEB OF SCIENCES), duas bibliotecas digitais (Banco de Teses da CAPES e SciELO) e um buscador acadêmico (Google Acadêmico) dando ênfase aos trabalhos publicados nos últimos 10 anos (2015 a 2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1-Histórico e sustentabilidade dos plásticos

O desenvolvimento dos plásticos iniciou no século XIX, a partir da modificação de materiais naturais, como por exemplo, a baquelite, primeiro polímero sintético. A Figura 1 apresenta a reação de formação da mesma, através da policondensação do fenol com formaldeído. O formaldeído reage com o fenol em uma reação de substituição eletrofílica no próprio anel aromático, o grupo metileno (CH_2) liga-se ao anel, formando um polímero tridimensional, que é a baquelite propriamente dita. Nos anos 1950 e 1960 houve uma expansão significativa do uso dos plásticos, em virtude da popularização das embalagens descartáveis, principalmente as embalagens de alimentos (Cooper Hewitt, 2019).

Figura 1- Representação do polímero sintético baquelite.



Fonte: Materiais Júnior, 2019.

Esse avanço resultou em um crescimento exponencial da produção global, que passou de cerca de 2 milhões de toneladas em 1950 para aproximadamente 450 milhões de toneladas de plástico por ano, cerca de 57 kg/pessoa, isso significa dizer que a cada ano mais de 350 milhões de toneladas de plástico tornam-se lixo (OECD, 2022).

Dados do ano de 2023 mostram que somente no Brasil, produz-se cerca de 220 a 300 mil toneladas de resíduos sólidos diariamente, destacando que aproximadamente 30 - 40% desse total são atribuídos a materiais plásticos utilizados em embalagens, materiais esses que são em sua maioria descartados incorretamente, elevando assim o impacto ambiental (ABREMA, 2024).

Dessa forma, os problemas criados pelo acúmulo das embalagens sintéticas e a sua reciclagem, tem sido uma forma de incentivo para pesquisas e maiores investimentos na área de materiais biodegradáveis, e outras alternativas mais sustentáveis na área de embalagens. Desde os anos 2000, após a crise do petróleo e a conscientização ambiental, as embalagens evoluíram para que se fosse possível incorporar materiais mais sustentáveis, devido à cobrança por alternativas ecológicas, que atendessem as demandas em relação a solução das evidências de poluição por microplásticos e do acúmulo em ecossistemas (Open Access Government, 2021).

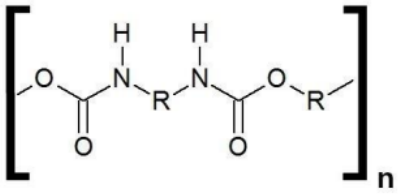
Do ponto de vista ambiental, o principal problema do uso de polímeros sintéticos é a sua origem de fontes petroquímicas e a sua degradabilidade. Os produtos feitos a partir do PU não são degradados naturalmente contribuindo para o acúmulo de resíduos, além da sua produção frequente envolver compostos tóxicos que podem ser nocivos à saúde durante a sua fabricação e descarte (Datta; Wloch, 2019).

Assim a utilização de polióis obtidos a partir de óleo vegetais surge como alternativa para a produção de poliuretanos sustentáveis, uma vez que esses materiais derivados de fontes renováveis, auxiliam na redução da dependência do petróleo e oferecem a possibilidade de contribuir para a redução do impacto ambiental através do desenvolvimento de materiais ecologicamente corretos (Luchese, 2018).

2-Poliuretanos sustentáveis

Os poliuretanos, produzidos a partir de polióis derivados de óleos vegetais, têm recebido crescente atenção como alternativas aos poliuretanos convencionais, devido ao potencial de reduzir a dependência de insumos fósseis e mitigar impactos ambientais associados à produção de polímeros sintéticos. Além da origem renovável, esses materiais apresentam boa resistência mecânica, flexibilidade e estabilidade química, o que os torna promissores em aplicações industriais variadas (PARASKAR et al., 2021; SHI et al., 2024).

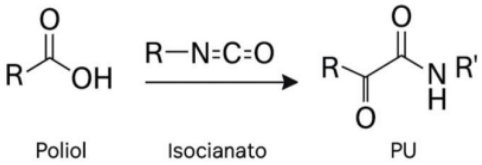
Figura 2- Estrutura química do poliuretano



Fonte: eCycle, 2016.

A síntese do PU ocorre da reação de poliadição entre polióis e di- ou poli isocianato na presença (Figura 3). Estruturalmente, os polióis vegetais são obtidos por meio da modificação química de óleos vegetais, nos quais são introduzidos grupos hidroxila ao longo das cadeias derivadas de ácidos graxos, permitindo sua posterior reação com diisocianatos durante a formação do poliuretano (Mo et al., 2024).

Figura 3 - Reação de formação do poliuretano



O PU é um polímero caracterizado por uma estrutura segmentada que compreende segmentos rígidos, derivados de diisocianatos de cadeia curta e extensores de cadeia, e segmentos flexíveis, originários de polióis de cadeia longa. Os segmentos flexíveis, conferem ao material elasticidade, maciez e capacidade de alongamento. No entanto, os segmentos rígidos, oriundos, são responsáveis por características como, rigidez e resistência mecânica, devido à formação de pontos de reticulação física (Savioli, 2020; Chaawraba et al, 2026).

A reticulação polimérica, ou também chamado crosslinking, refere-se à formação de ligações covalentes entre cadeias poliméricas diferentes, aumentando o peso molecular do material, tendo como consequência, maior estabilidade térmica e estrutural. No caso dos segmentos rígidos, essas regiões tendem a se auto-organizar em domínios separados dentro da própria matriz polimérica, em virtude do empacotamento mais denso e da limitação em relação à mobilidade das cadeias (Savioli, 2020).

As propriedades, a proporção e a natureza química dos polióis e isocianatos influenciam nas características dos poliuretanos (Savioli, 2020; Chaawraba et al, 2026). Poliuretanos obtidos de isocianatos aromáticos possuem melhor estabilidade térmica e são mais rígidos, enquanto os isocianatos alifáticos produzem materiais com melhor resistência às intempéries, mas menor estabilidade térmica e mais flexíveis. Reações com excesso de isocianato tendem a formar materiais mais duros e reticulados. Em contraste, quando o poliol está em excesso (ou seja, NCO: OH <1), a rede fica sub-reticulada, produzindo polímeros mais macios e flexíveis com resistência química reduzida. Os polióis de óleos vegetais introduzem cadeias alifáticas longas e flexíveis que atuam como plastificantes internos na matriz do poliuretano. Essa estrutura melhora propriedades como elasticidade, tenacidade e hidrofobicidade, mas inerentemente reduz a densidade de ligações cruzadas e aumenta a mobilidade da cadeia, frequentemente levando a menor resistência à tração, módulo e estabilidade térmica (Chaawraba et al, 2026). Outro fator importante nas propriedades do poliuretano é o índice de hidroxila do poliol, que representa a quantidade de grupos funcionais -OH disponíveis para reagir com isocianatos. Esse índice está diretamente relacionado à reatividade do poliol e à densidade de reticulação do polímero formado (Echeverria-Altuna et al, 2022). Polióis com um índice de hidroxilas mais elevado, geralmente de baixo peso molecular, possuem uma quantidade maior de grupos reativos por unidade de massa, resultando em uma maior densidade de ligações cruzadas e, consequentemente, poliuretanos mais rígidos e resistentes. Esses materiais são amplamente empregados em espumas rígidas para isolamento térmico e revestimentos industriais, justamente porque essas aplicações exigem maior estabilidade dimensional e resistência térmica (Chaawraba et al, 2026). Por outro lado, polióis com baixo índice de hidroxilas, associados a cadeias mais longas e flexíveis, promovem a formação de poliuretanos com um grau menor de entrecruzamento (crosslinking), mais flexíveis e elásticos, indicados para a produção de curativos médicos, espumas flexíveis, embalagens etc. (Guo et al., 2017).

Em relação às hidroxilas outro fator a se considerar é o tipo de hidroxila, grupos hidroxilas primários demonstram reatividade significativamente maior em relação aos isocianatos quando comparados aos hidroxilas secundários (Chaawraba et al, 2026). Dessa forma, na escolha adequada do poliol, deve-se considerar não apenas sua massa molar, mas também seu índice de hidroxilas, para o desempenho esperado do poliuretano (Guo et al., 2017).

Além das características estruturais, a consolidação dos poliuretanos sustentáveis em escala industrial depende de fatores técnicos e econômicos. Estudos mostram que revestimentos, espumas e sistemas híbridos obtidos a partir de polióis vegetais apresentam menor emissão de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e maior compatibilidade ambiental quando comparados aos sistemas petroquímicos, embora desafios como custo, durabilidade e escalabilidade industrial ainda precisem ser superados (KAIKADE; SABNIS, 2022).

A utilização de poliuretanos de origem vegetal tem avançado como alternativa relevante para superar

limitações comuns em filmes biopoliméricos, especialmente no que se refere à barreira contra umidade. Estudos mostram que polióis epoxidados ou funcionalizados, como aqueles derivados do óleo de soja, favorecem a formação de filmes mais homogêneos, estáveis e com maior hidrofobicidade. Xu et al. (2022) demonstraram que filmes de poliuretano obtidos a partir de poliol epoxidado de soja apresentam redução na permeabilidade ao vapor d'água e aumento do ângulo de contato, indicando melhoria significativa nas propriedades de barreira. Esses resultados reforçam o potencial dos poliuretanos sustentáveis para aplicações técnicas, biomédicas e de embalagem, ampliando seu papel no desenvolvimento de materiais avançados.

A crescente incorporação de poliuretanos de origem vegetal em matrizes naturais, como a quitosana, tem ampliado o desenvolvimento de filmes biopoliméricos com propriedades mecânicas e de barreiras ajustáveis. Assim, compreender como esses polímeros interagem e como sua estrutura influencia o desempenho final é fundamental para projetar materiais híbridos sustentáveis e tecnologicamente competitivos.

3-Filmes poliméricos

Os polímeros são moléculas que constituem-se de pequenas unidades chamadas de monômeros, que juntas formam compostos de altas massas moleculares, lineares ou ramificados. Devido a composição de longas cadeias de carbono dos polímeros, os mesmos são resistentes à degradação, mas por serem em sua maioria provenientes de fontes não renováveis, acarretam diversos problemas, como por exemplo, elevado consumo de energia, problemas ambientais etc. Em consequência disso, muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de substituir esse material e atender as necessidades das indústrias, que buscam por materiais oriundo de fontes renováveis para a produção de embalagens biodegradáveis que sejam similares a embalagens sintéticas (Ballesteros et al., 2017; Ye et al., 2017).

As embalagens biodegradáveis são divididas em filmes biodegradáveis ou biopoliméricos e revestimentos comestíveis. Os filmes são estruturas pré-formadas que têm a função de envolver os alimentos, enquanto que os chamados revestimentos formam-se durante a aplicação de maneira direta nos alimentos a serem cobertos (Yousuf et al., 2018). Ambos são utilizados para a preservação do produto, auxiliam no controle e inibição da migração de umidade, dióxido de carbono, oxigênio e aromas (Ballesteros et al., 2017).

A classificação dos filmes biopoliméricos pode ser realizada a partir da origem dos polímeros (polissacarídeos, proteínas ou lipídios), de sua funcionalidade (como filmes convencionais, ativos e inteligentes) ou ainda em termos de estrutura, podendo ser simples, compostos ou híbridos. Filmes híbridos — compostos por duas ou mais matrizes poliméricas — ampliam a possibilidade de otimização simultânea de propriedades mecânicas, ópticas, térmicas e de barreira, uma vez que combinam características complementares dos materiais envolvidos.

A performance final dos filmes depende diretamente da formulação, incluindo concentração de polímeros, uso de plastificantes, agentes de reforço ou compatibilizantes, e do método de fabricação. Técnicas como *casting*, extrusão e eletrofiação influenciam a ordenação das cadeias poliméricas, a densidade da matriz, a espessura e a homogeneidade do filme, impactando diretamente suas propriedades mecânicas, físico-químicas e de barreira (DIRPAN et al., 2023). Assim, a compreensão da interação entre composição, processamento e estrutura é fundamental para projetar filmes com desempenho controlado, além de definir a sua melhor aplicabilidade.

3.1 Propriedades funcionais dos filmes com poliuretano

A relação estrutura–desempenho em filmes híbridos é determinada pela interação entre composição, organização morfológica, intensidade das interações químicas e a capacidade dos polímeros Mo et al. (2024) afirmam que a presença de segmentos rígidos e flexíveis nos poliuretanos vegetais permite modular resistência e flexibilidade. Quando combinados a outro polímero, esses segmentos contribuem para uma matriz mais resistente à ruptura e menos suscetível a deformações permanentes.

Mo, Huang e Hu (2024) descrevem que a densidade de ligações uretano aumenta rigidez e estabilidade térmica, enquanto a formação de redes híbridas contínuas reduz a mobilidade das cadeias e melhora propriedades mecânicas e de barreira.

Piotrowska-Kirschling e Brzeska (2020) demonstram que a compatibilização reduz falhas interfaciais, favorecendo a dissipação homogênea de tensões ao longo da estrutura. Isso resulta em aumento de resistência à tração, melhor elongação e comportamento mecânico mais previsível. A interdependência entre estrutura química, organização morfológica e interação molecular torna possível ajustar o desempenho mecânico mediante mudanças na formulação ou no grau de modificação dos polímeros usados.

A estabilidade térmica de filmes híbridos com poliuretano é fortemente influenciada pela densidade de ligações uretânicas e pela organização das cadeias. Usman et al. (2016) mostram que ligações de

hidrogênio estabelecidas entre grupos uretano e hidroxilas da quitosana reforçam a coesão estrutural, dificultando a degradação térmica. Esse efeito é ampliado pela presença de segmentos rígidos provenientes do poliuretano, que conferem maior resistência ao início da decomposição.

De acordo com Mo et al. (2024), o aumento da densidade de ligações uretano reduz a mobilidade segmentar do polímero, tornando a estrutura mais compacta e termicamente estável. Essa menor mobilidade é um dos fatores que explicam o comportamento térmico superior de filmes compatibilizados em comparação a sistemas fisicamente misturados, que apresentam maior heterogeneidade e menor resistência ao calor.

As propriedades ópticas dos filmes híbridos dependem diretamente da uniformidade microestrutural. A compatibilização reduz heterogeneidades que causariam dispersão de luz, resultando em maior transparência ou opacidade controlada, dependendo da formulação. Piotrowska-Kirschling e Brzeska (2020) explicam que filmes mais homogêneos apresentam transmitância mais regular, importante para aplicações que exigem materiais visualmente uniformes.

Xu et al. (2021) reforçam que a estabilidade físico-química proporcionada pelas interações moleculares da matriz híbrida contribui para manter as propriedades ópticas ao longo do tempo, evitando alterações decorrentes de degradação, migração de plastificantes ou rearranjos estruturais indesejados.

As propriedades de barreira são essenciais em aplicações como embalagens biodegradáveis. Filmes híbridos compatibilizados apresentam menor permeabilidade ao vapor d'água e gases devido à compactação da matriz resultante das interações intermoleculares entre quitosana e poliuretano. Piotrowska-Kirscling e Brzeska (2020) destacam que a redução de microcanais e vazios estruturais aumenta a resistência à difusão de moléculas.

Segundo Xu et al. (2021), a presença de segmentos rígidos de poliuretano aumenta a densidade da rede polimérica, contribuindo para menor permeabilidade.

CONCLUSÃO

Os poliuretanos de óleos vegetais emergiram como um material fundamental de polímeros sustentáveis, contribuindo para a preservação do meio ambiente e demonstrando desempenho comparável com os polímeros derivados de petróleo. A utilização de poliuretanos sustentáveis na produção de filmes biopoliméricos representa uma alternativa viável e alinhada às exigências dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Essa substituição de insumos fósseis por fontes renováveis não apenas reduz o impacto ambiental, mas também confere aos filmes biopoliméricos flexibilidade e propriedades de barreira promissoras.

Entretanto, evidencia-se a necessidade estudos mais detalhados das características estruturais, térmicas e mecânicas desses materiais para garantir a estabilidade e a padronização dos filmes biopoliméricos. Assim, pesquisas contínuas e análises de caracterização mais robustas tornam-se indispensáveis para viabilizar e direcionar esses materiais para aplicações comerciais e industriais seguras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPCEM), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS)

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). 2024**.** Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024.

BALLESTEROS, J.; MARTÍNEZ, L.; GARCÍA, R. et al. 2017. Advances in bio-based polyurethane materials: synthesis and characterization.

CAI, J. et al. 2022. Biopolymer-based functional films for packaging applications.

CHAAWRABA, A.; JI, X.; ZHOU, K.; TRAN, M. H.; CHEN, X.; YAN, N. 2026. Converting natural biopolymers to sustainable bioplastics via structure engineering.

COOPER HEWITT. 2019**.** History of plastics. Smithsonian Design Museum.

DATTA, J.; WLOCH, M. 2019. Environmental impact of polyurethane production.

DIRPAN, A.; NUR, A.; HAKIM, M. et al. 2023. Biodegradable polyurethane composites from natural resources: synthesis and characterization.

ECHEVERRIA-ALTUNA, J.; MARTÍNEZ, A.; GONZÁLEZ, M. et al. 2022. Biodegradable polyurethane materials: advances and applications.

GAIA. 2021. Plastic pollution and waste generation report.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. et al. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made.

GUO, B.; MA, P. X. et al. 2017. Polyurethanes based on renewable resources: synthesis and biomedical applications.

KAIKADE, S. D.; SABNIS, A. S. 2022. Polyurethane composites from renewable resources: synthesis, properties and applications.

LILACS. 2025. Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde.

LUCHESI, C. 2018. Sustainable polyols from vegetable oils.

MO, X.; HUANG, Y.; HU, W. 2024. Bio-based polyurethane materials: synthesis, properties and sustainable applications.

MO, X.; LI, Y.; WANG, J. et al. 2024. Advances in biodegradable polyurethane composites for sustainable packaging.

OECD. 2022. Global Plastics Outlook. Paris: OECD Publishing.

OPEN ACCESS GOVERNMENT. 2021. Plastics and sustainability: addressing microplastic pollution.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). 2015. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável.

PARASKAR, P. M. et al. 2021. Vegetable oil-based polyurethane materials and applications.

PIOTROWSKA-KIRSCHLING, A.; BRZESKA, J. 2020. Sustainable polyurethanes: synthesis, properties and applications.

PLASTICS EUROPE. 2022. Plastics – the Facts 2022: An analysis of European plastics production, demand, conversion and end-of-life management.

PILAPITIYA, P. G. C. N. T.; RATNAYAKE, A. S. 2024. The world of plastic waste: a review.

SAVIOLI, J. 2020. Polímeros sustentáveis: desafios e perspectivas.

SCOPUS. 2025. Base de dados bibliográfica multidisciplinar.

SHI, D.; JIANG, X.; XU, Y. et al. 2024. Review of mechanical and barrier properties of chitosan composite films.

USMAN, M.; KHAN, M.; AHMAD, S. et al. 2016. Bio-based polyurethane materials: synthesis, properties and potential applications.

WEB OF SCIENCE. 2025. Multidisciplinary citation database. Clarivate Analytics.

XU, J.; LI, H.; ZHANG, Y. et al. 2022. Progress in bio-based polyurethane materials: synthesis, properties and applications.

YE, L.; ZHANG, H.; WANG, Y. et al. 2017. Biodegradable polyurethane composites reinforced with natural fibers.

YOUSUF, M.; KHAN, M.; AHMAD, S. et al. 2018. Development of bio-based polyurethane composites: synthesis, properties and applications.