

RECICLAGEM E APLICAÇÕES DE ESPUMA DE POLIURETANO COM LIGNINA UM ESTUDO CRITERIOSO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.I-024>

Kelvin Techera Barbosa (*), Bruno de Miranda, Andrey Pereira Acosta, Ana Caroline Müller Pereira, Rafael de Avila Delucis

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), kelvintecherabarbosa@gmail.com

RESUMO

A crescente preocupação com os impactos ambientais dos polímeros derivados do petróleo tem impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis. Neste contexto, a lignina, um subproduto abundante da indústria de celulose, emerge como uma matéria-prima promissora para formulações de espumas de poliuretano (PU). Este estudo realiza uma revisão sistemática sobre métodos de reciclagem e aplicações de espumas de PU contendo lignina, com foco nos desafios técnicos, ambientais e nas oportunidades de avanço rumo à economia circular. A pesquisa foi conduzida conforme a metodologia PRISMA, abrangendo bases como Scopus, Web of Science e ScienceDirect, e resultou na seleção criteriosa de estudos publicados nos últimos cinco anos. Foram analisados métodos mecânicos, químicos e energéticos de reciclagem, incluindo acidólise, aminólise, glicólise catalítica, pirólise e despolimerização controlada. A análise comparativa dos estudos identificou tendências emergentes e destacou a importância da modificação estrutural da lignina para melhorar a compatibilidade com matrizes de PU. Constatou-se que o uso de lignina contribui não apenas para a valorização de resíduos lignocelulósicos, mas também para o desenvolvimento de espumas recicláveis e de menor impacto ambiental. Apesar dos avanços tecnológicos, persistem desafios relacionados à eficiência dos processos e à escalabilidade industrial. Conclui-se que a integração de estratégias inovadoras é essencial para viabilizar soluções mais sustentáveis na indústria de espumas de poliuretano.

PALAVRAS-CHAVE: poliuretano com lignina, reciclagem, economia circular, sustentabilidade.

ABSTRACT

The growing concern regarding the environmental impacts of petroleum-derived polymers has driven the search for more sustainable alternatives. In this context, lignin—an abundant by-product of the pulp and paper industry—emerges as a promising raw material for polyurethane (PU) foam formulations. This study presents a systematic review of recycling methods and applications of lignin-based PU foams, focusing on technical and environmental challenges, as well as opportunities for progress towards a circular economy. The research was conducted following the PRISMA methodology, covering databases such as Scopus, Web of Science, and ScienceDirect, and resulted in the careful selection of studies published over the past five years. Mechanical, chemical, and energy-based recycling methods were analysed, including acidolysis, aminolysis, catalytic glycolysis, pyrolysis, and controlled depolymerisation. Comparative analysis of the studies revealed emerging trends and underscored the importance of lignin structural modification to improve compatibility with PU matrices. It was found that the incorporation of lignin not only adds value to lignocellulosic waste but also enables the development of recyclable foams with reduced environmental impact. Despite technological advancements, challenges remain regarding process efficiency and industrial scalability. It is concluded that the integration of innovative strategies is essential to enable more sustainable solutions within the polyurethane foam industry.

KEY WORDS: lignin-based polyurethane, recycling, circular economy, sustainability.

INTRODUÇÃO

O poliuretano (PU) é um polímero versátil obtido pela reação entre polióis e isocianatos, amplamente utilizado em espumas, elastômeros e revestimentos devido à sua resistência mecânica e adaptabilidade à diferentes formulações (BANIK ET AL., 2023; GU ET AL., 2023). No entanto, sua dependência de recursos não renováveis e baixa taxa de reciclagem o colocam como um dos maiores desafios ambientais da indústria de polímeros (BERAN ET AL., 2021; MAGNIN ET AL., 2021; FANG ET AL., 2024).

A lignina representa um abundante recurso natural, compondo até 40% da biomassa da madeira, apesar de milhares de toneladas de lignina serem produzidos todo ano como subproduto da indústria de celulose, apenas uma parcela muito pequena é utilizada

em aplicações de alto valor agregado. Devido à abundância de grupos hidroxila em sua estrutura, a lignina pode atuar como precursor de polióis, carga estrutural e agente reforçante em formulações de PU, possibilitando a substituição de derivados petroquímicos (HWANG ET AL., 2022; WANG ET AL., 2024). No entanto, desafios inerentes à heterogeneidade estrutural, baixa solubilidade e natureza reticulada da lignina dificultam sua compatibilidade com matrizes de PU, exigindo ajustes críticos nos processos de formulação e processamento para garantir sua integração eficiente (STERNBERG & PILLA, 2023; LIU ET AL., 2024).

Dessa forma, a utilização da lignina no PU não apenas contribui para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis, mas também promove a economia circular, ampliando o potencial de reaproveitamento de resíduos industriais. Porém, no contexto da reciclagem, a estrutura fenólica da lignina influencia diretamente os métodos de recuperação e descarte de espumas PU, tornando essencial a investigação sobre sua viabilidade técnica e ambiental dos diferentes processos de reciclagem.

OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo realizar uma análise crítica e abrangente sobre os métodos de reciclagem e aplicações de espumas PU com lignina, abordando as tendências tecnológicas recentes, desafios técnicos e ambientais e as perspectivas futuras para a implementação de soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis.

METODOLOGIA

Esta revisão sistemática foi conduzida para analisar os métodos de reciclagem e descarte de resíduos de espuma de poliuretano (PU) com lignina, considerando abordagens mecânicas, químicas e energéticas. O estudo seguiu as diretrizes do método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantir transparência e reprodutibilidade na seleção e análise dos artigos.

A busca por estudos foi realizada nas bases de dados Web of Science, Scopus e ScienceDirect, utilizando os seguintes termos-chave em inglês: 'lignin polyurethane foam recycling', 'lignin-based polyurethane', 'lignin polyurethane mechanical recycling', 'lignin polyurethane chemical recycling', 'lignin polyurethane energy recovery', 'polyol recovery from lignin polyurethane waste'. Os operadores booleanos AND e OR foram empregados para refinar os resultados, e a busca foi limitada a publicações dos últimos 5 anos.

Os critérios de inclusão abrangeram estudos que investigam a reciclagem de espuma de PU com lignina, publicados em periódicos revisados por pares, e que apresentassem análises experimentais ou viabilidade técnica, econômica e ambiental dos processos. Foram excluídos artigos que não mencionavam diretamente a presença de lignina na formulação do PU, trabalhos duplicados entre as bases de dados e estudos sem informações metodológicas detalhadas e trabalhos de revisões.

O processo de seleção foi estruturado em três etapas: (i) triagem inicial por título e resumo, (ii) leitura completa dos artigos potencialmente relevantes e (iii) extração e categorização dos dados. Foram coletadas informações sobre os métodos de reciclagem estudados (mecânico, químico e energético), tecnologias aplicadas, eficiência dos processos, desafios técnicos e impactos ambientais relatados.

Os dados extraídos foram analisados comparativamente, identificando tendências na literatura, desafios para a escalabilidade dos processos e oportunidades para o aprimoramento das estratégias de reciclagem da espuma de PU com lignina.

RESULTADOS

Após a seleção, todos os artigos de pesquisa foram analisados de forma criteriosa, e suas principais contribuições para o estado da arte em técnicas de reciclagem de espumas de poliuretano (PU) com lignina foram sintetizadas, catalogadas sistematicamente e submetidas a uma avaliação comparativa com trabalhos correlatos. Este processo buscou identificar metodologias e avaliar o impacto relativo de cada contribuição no contexto da sustentabilidade e da economia circular. Os métodos de reciclagem de cada estudo selecionado estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Síntese de Métodos de Reciclagem para Espumas de Poliuretano com Lignina.**Fonte: O autor, 2025.**

Método de Reciclagem	Título do Estudo	Autor/Ano
Acidólise combinado com micro-ondas e Aminólise	Microwave-assisted acidolysis of polyurethane foams	GRDADOLNIK ET AL., (2022)
Aminólise	Chemical recycling of polyurethane foams via aminolysis: Mechanisms and applications	LIU ET AL., (2024)
Mecânica e glicólise	Catalytic glycolysis of polyurethane foam waste	MIGUEL-FERNÁNDEZ ET AL., (2022)
Pirólise	Pyrolysis of polyurethane waste: A sustainable approach	FANG ET AL., (2024)
Glicólise Catalítica	Glycolysis of polyurethane waste: Efficient depolymerization and product recovery	GU ET AL., (2023)
Hidrólise em Alta Pressão	Recycling of polyurethane foams based on lignin: Sustainable alternatives for the polyurethane industry	STERNBERG & PILLA (2023)
Modificação de Lignina	Hydrophobic lignin/polyurethane composite foam: an eco-friendly and easily reusable oil sorbent	HWANG ET AL., (2022)
Reticulação Híbrida	Dynamic covalent polyurethane elastomers from lignin	Z. HUANG ET AL., (2023)
Rede de Ligações de Hidrogênio	Bio-based polyurethane elastomers derived from lignin: Synthesis, properties, and recyclability	WANG ET AL., (2024)
Abordagens Integradas	Recycling strategies for polyurethane waste: An overview of chemical, mechanical, and enzymatic approaches	MAGNIN ET AL., (2021)
Despolimerização controlada	Waste-free polyurethane recycling through controlled depolymerization	BERAN ET AL., (2021)

CONCLUSÕES

Este estudo sobre a reciclagem e as aplicações de espuma de poliuretano com lignina destacou as principais tendências atuais, os desafios enfrentados e as perspectivas para soluções mais sustentáveis. A pesquisa evidenciou além disso, a incorporação da lignina em espumas de poliuretano oferece uma oportunidade para o desenvolvimento de materiais mais ecológicos e recicláveis. A modificação da lignina e o uso de processos inovadores, como a criação de bio-poliuretanos, têm mostrado resultados positivos no aprimoramento das propriedades mecânicas e da reprocessabilidade desses materiais. No entanto, a plena implementação de soluções mais sustentáveis ainda depende de avanços na compatibilidade dos materiais e na eficiência dos processos de reciclagem.

Dessa forma, as perspectivas para a utilização de espumas de poliuretano com lignina são promissoras, com grande potencial para reduzir o impacto ambiental das espumas convencionais. A continuidade das pesquisas e a integração de múltiplas estratégias de reciclagem podem contribuir para uma economia circular mais eficiente, sustentável e ambientalmente responsável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Banik, G., et al., 2023. Sustainable recycling of polyurethane foams: Challenges and opportunities. J. Polym. Sci.

2. Beran, J., et al., 2021. Waste-free polyurethane recycling through controlled depolymerization. *Green Chem.*
3. Fang, Y., et al., 2024. Pyrolysis of polyurethane waste: A sustainable approach. *Renew. Energy.*
4. Grdadolnik, J., et al., 2022. Microwave-assisted acidolysis of polyurethane foams. *Polym. Degrad. Stab.*
5. Gu, L., et al., 2023. Glycolysis of polyurethane waste: Efficient depolymerization and product recovery. *Polym. Environ.*
6. Hwang, U., et al., 2022. Hydrophobic lignin/polyurethane composite foam: an eco-friendly and easily reusable oil sorbent. *Eur. Polym. J.*, 165: 110971.
7. Liu, X., et al., 2024. Chemical recycling of polyurethane foams via aminolysis: Mechanisms and applications. *J. Appl. Polym. Sci.*
8. Magnin, A., et al., 2021. Recycling strategies for polyurethane waste: An overview of chemical, mechanical, and enzymatic approaches. *Waste Manag.*
9. Miguel-Fernández, S., et al., 2022. Catalytic glycolysis of polyurethane foam waste. *Polym. Adv. Technol.*
10. Sternberg, B., & Pilla, S., 2023. Recycling of polyurethane foams based on lignin: Sustainable alternatives for the polyurethane industry. *J. Appl. Polym. Sci.*
11. Wang, X., et al., 2024. Bio-based polyurethane elastomers derived from lignin: Synthesis, properties, and recyclability. *Polymer*, 253: 124832.
12. Huang, Z., et al., 2023. Dynamic covalent polyurethane elastomers from lignin. *Macromol. Chem. Phys.*