

ANÁLISE DA RETICULAÇÃO E DA TRANSIÇÃO VÍTREA DA LIGNINA

VINICIUS MARTINS¹; MATHEUS DE PAULA GOULARTE; DARCI ALBERTO GATTO³

¹Instituto Federal Sul-rio-grandense e Universidade Federal de Pelotas 1 –
viniciushiper@yahoo.com.br

² Universidade Federal de Pelotas – almatheusgoularte@gmail.com

³ Universidade Federal de Pelotas – darcigatto@yahoo.com

1. INTRODUÇÃO

A lignina, o segundo biopolímero natural mais abundante na Terra depois da celulose, é o principal polímero aromático da natureza e um componente estrutural fundamental da madeira (MILÍ et al., 2022). Sua estrutura complexa e altamente ramificada atua ligando as fibras de celulose e hemicelulose e conferindo rigidez, resistência e proteção contra ataques de microrganismos e estresses ambientais (BÖRCSÖK; PÁSZTORY, 2021). Um aspecto crucial para a utilização da lignina em materiais é o seu comportamento termofísico. A lignina é um polímero amorfo que exibe uma transição vítrea (T_g) em uma faixa de temperatura característica, na qual ela muda de um estado rígido (vítreo) para um estado mais flexível e plástico (BÖRCSÖK; PÁSZTORY, 2021). A temperatura de transição vítrea da lignina, juntamente com sua capacidade de reticulação, são parâmetros essenciais que ditam sua processabilidade e as propriedades finais de materiais como adesivos, espumas, plásticos e compósitos (BÖRCSÖK; PÁSZTORY, 2021; CARVALHO; FROLLINI, 1999). Este trabalho busca realizar uma análise da lignina com foco em duas de suas propriedades mais relevantes para a ciência de materiais: a reticulação e a transição vítrea. A discussão explorará como a modificação química e térmica influenciam essas propriedades e como esse conhecimento pode ser aplicado para o desenvolvimento de materiais avançados e sustentáveis. O objetivo final é sintetizar o conhecimento relevante sobre a lignina, como um aglutinante natural no processo de fabricação de pellets, usando calor e pressão para manter as partículas de madeira moída unidas e formar um biocombustível denso, de alto valor energético e sem necessidade de aditivos químicos. A lignina amolece com o calor e o aumento da pressão, fluindo e ligando as fibras de celulose e hemicelulose, garantindo a coesão e a durabilidade dos pellets.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi realizado por meio de uma revisão de literatura, com base em artigos de periódicos e livros técnicos. A pesquisa concentrou-se nos conceitos de reticulação (*crosslinking*), transição vítrea (*glass transition temperature*, T_g) e a aplicação da lignina em pellets de madeira. As fontes bibliográficas foram selecionadas com base em sua relevância e atualidade, abrangendo os últimos 25 anos de pesquisa, com um foco especial em revisões de literatura que sintetizam o estado da arte e em pesquisas originais que apresentam resultados concretos sobre as propriedades de reticulação e transição vítrea da lignina. A busca foi conduzida em bases de dados como Google Scholar, Web of Science e MDPI, utilizando termos-chave como "*lignin crosslinking*", "*lignin glass transition temperature*", "*lignin phenolic resins*", "*thermally modified wood*" e "*lignin-based polymers*". As informações sobre a estrutura fundamental da lignina, a

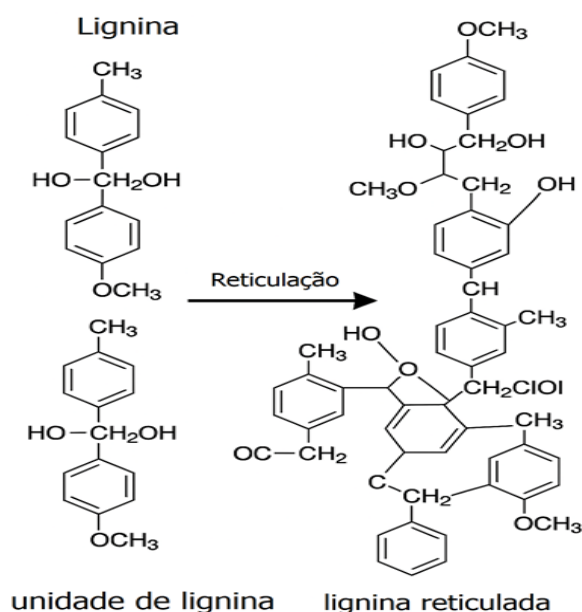
influência da sua composição (unidades guaiacil, siringil e p-hidroxifenil). O foco foi entender a base teórica da transição vítrea e da reticulação, e como esses fenômenos se manifestam na lignina. Estudos que utilizam espectroscopias (como RMN e FTIR) e análises térmicas (DSC, TG) para caracterizar a lignina e seus derivados foram prioritários.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A lignina, um polímero aromático complexo e ramificado, com comportamento termoplástico e sua capacidade de reticulação são propriedades-chave a fabricação de produtos de pós de madeira aglomerados com lignina. A transição vítrea (T_g) da lignina é a temperatura na qual ela muda de um estado rígido e vítreo para um estado flexível. Conforme demonstrado por BÖRCSÖK; PÁSZTORY (2021), a T_g da lignina na madeira úmida fica em torno de 80 a 100 °C, enquanto na madeira seca pode chegar a 205 °C. Essa diferença é atribuída ao papel da água como plastificante, quebrando as ligações de hidrogênio intermoleculares da lignina e permitindo o movimento segmental das macromoléculas. A modularidade da T_g é um fator crítico para a processabilidade da lignina em diversas aplicações.

O estudo de Seki *et al.* (2022) sobre a deformação plástica da madeira delignificada, por exemplo, mostra uma correlação linear entre a tensão no ponto de início do fluxo plástico e a temperatura de pico, que corresponde à T_g da lignina na madeira saturada com água. Esse resultado é crucial, pois sugere que a deformabilidade da madeira pode ser controlada ajustando a T_g da lignina por meio de processos como a delignificação. A modificação química da lignina também impacta diretamente sua T_g . A sulfonação e a esterificação da lignina tendem a diminuir a T_g , dependendo do grau de modificação (BÖRCSÖK; PÁSZTORY, 2021). Isso contrasta com o uso de monômeros derivados da lignina (monolignóis), que podem levar a polímeros com T_g s na faixa de 100 a 200 °C (MAHAJAN *et al.*, 2025). A reticulação da lignina é a formação de ligações covalentes que criam uma rede polimérica tridimensional, sendo essa propriedade a chave para o desenvolvimento de materiais termoendurecíveis, como exibe a Figura 1.

Figura 1: Reticulação da Lignina



A aplicação da lignina como aglutinante (*binder*) também é amplamente explorada. O conhecimento da Tg da lignina e sua capacidade de reticulação é aplicado em processos de fabricação de produtos de madeira. Em processos como a densificação de superfícies de madeira, a soldagem de madeira e a produção de pellets, a madeira é aquecida acima da Tg da lignina em condições de alta umidade. A lignina amolecida atua como um adesivo natural, fluindo e preenchendo os espaços entre as fibras, o que cria novas ligações e aumenta a resistência mecânica do material após o resfriamento (BÖRCSÖK; PÁSZTORY, 2021). O processo de delignificação também influencia o comportamento da madeira. Seki *et al.* (2022) demonstram que a remoção da lignina da lamela média, especialmente nos cantos das células, reduz a resistência inicial ao fluxo plástico da madeira, permitindo maior deformação sem destruição da parede celular. Conforme a delignificação avança para a parede celular, a flexibilidade da madeira aumenta significativamente, o que é um fator-chave para processos de moldagem de madeira de baixa energia.

Segundo Magelli *et al.* (2009), a produção de pellets envolve três operações unitárias principais: secagem, redução de tamanho (moagem) e densificação (compactação). Inicialmente, a serragem ou matéria-prima, que chega com umidade entre 50% e 65%, passa por um processo de secagem em secador rotativo, onde seu teor de água é reduzido para aproximadamente 10%. Em seguida, o material seco é submetido à moagem em um moinho de martelo, equipado com telas de 6,4 mm ou 3,2 mm, para homogeneização e adequação do tamanho das partículas à etapa seguinte. Esse processo é acionado por um motor elétrico, e parte da energia empregada é convertida em calor. Por fim, a biomassa moída é compactada em uma extrusora para a formação dos pellets. Ao saírem da peletizadora, os pellets apresentam temperatura elevada, entre 70°C e 90°C, devido ao calor gerado por atrito durante a extrusão e ao pré-aquecimento do material. É essencial resfriar os pellets até aproximadamente 25°C para promover seu endurecimento e estabilização, além de assegurar a qualidade do produto durante o armazenamento e o manuseio.

A lignina, um biopolímero amorfo, possui a propriedade fundamental de amolecer ao ser submetida a calor e umidade, fenômeno conhecido como transição vítrea e de endurecer novamente quando resfriada. Essa característica é a chave que possibilita a peletização sem a necessidade de adesivos sintéticos. Durante a secagem, a redução da umidade de 50-65% para cerca de 10% é crucial, pois a água atua como plastificante, baixando a temperatura de transição vítrea da lignina. Na sequência, a moagem não apenas fragmenta o material, mas o pré-aquece por fricção, preparando a lignina para a próxima etapa. No momento da compactação, a combinação de alta pressão e do calor gerado pela extrusão eleva a temperatura do material para 70-90°C, faixa na qual a lignina, plasticizada pela umidade residual, amolece e se torna viscosa, revestindo e preenchendo os espaços entre as partículas. Por fim, o resfriamento dos pellets até aproximadamente 25°C causa a solidificação da lignina, que atua como um aglutinante natural, conferindo ao produto final sua resistência mecânica, densidade e estabilidade.

O valor encontrado para a temperatura de transição vítrea da lignina seca de pinus (Tg) a partir da regressão, foi de 167,7 °C e para a lignina saturada com água de 109 °C. Goring *et al* (15), encontraram valores de 127 e 146 °C para ligninas isoladas de coníferas de diferentes massas moleculares. A diferença entre os valores de Goring e as do Jordão *et al* pode estar ligado a diferenças no peso

molecular médio das amostras ensaiadas e ao próprio método utilizado no isolamento.

4. CONCLUSÕES

A transição vítrea da lignina, uma propriedade maleável, pode ser precisamente controlada por meio do teor de umidade e modificações químicas. Essa modularidade na T_g é um fator decisivo para a processabilidade da lignina, permitindo seu uso em uma ampla gama de processos industriais, como a soldagem e a densificação da madeira, onde o amolecimento da lignina facilita a formação de novas ligações e melhora as propriedades mecânicas do produto final. A capacidade de reticulação da lignina, por sua vez, é a base para o desenvolvimento de materiais termoendurecíveis de alta resistência. O uso da lignina pode resultar em materiais com propriedades mecânicas e de isolamento térmico superiores. O conhecimento sobre a reticulação e a transição vítrea da lignina é uma prerrogativa para pesquisas em engenharia madeireira.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BÖRCSÖK, Z.; PÁSZTORY, Z. **The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: an abbreviated literature survey.** European Journal of Wood and Wood Products, v. 79, n. 3, p. 511-526, 2021.
- CARVALHO, G.; FROLLINI, E. **Lignina em Espumas Fenólicas. Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 9, n. 1, p. 66-75, 1999.
- FEGHALI, E. *et al.* **Thermosetting Polymers from Lignin Model Compounds and Depolymerized Lignins.** Topics in Current Chemistry, v. 376, n. 3, p. 32, 2018.
- JORDAO, M. C. S. *et al.* **Influência da umidade no ponto de transição vítrea da lignina isolada de Pinus e Eucalipto Parte 1.** In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 1983, São Paulo. Congresso Anual da ABCP: anais. São Paulo: ABTCP, 1983. v. 3, p. 685-694.
- MAHAJAN, J. S. *et al.* **Toward Sustainable Materials: From Lignocellulosic Biomass to High-Performance Polymers.** Accounts of Materials Research, v. 6, n. 3, p. 316-326, 2025.
- MILÍ, M. *et al.* **Novel lignin as natural-biodegradable binder for various sectors—A review.** Journal of Applied Polymer Science, v. 139, n. 15, p. e51951, 2022.
- SEKI, M. *et al.* **Influence of delignification on plastic flow deformation of wood.** Cellulose, v. 29, p. 4153-4165, 2022.
- SHAH, S. W. A. *et al.* **Lignin-based additive materials: A review of current status, challenges, and future perspectives.** Additive Manufacturing, v. 74, p. 103711, 2023.
- TANG, Q. *et al.* **Lignin-Based Nanoparticles: A Review on Their Preparations and Applications.** Polymers, v. 12, n. 11, p. 2471, 2020.
- VASILE, C.; BAICAN, M. **Lignins as Promising Renewable Biopolymers and Bioactive Compounds for High-Performance Materials.** Polymers, v. 15, n. 15, p. 3177, 2023.
- ZHANG, Bowen *et al.* **Bio-based polymers from lignin.** The Innovation Materials, [S. l.], v. 2, n. 2, 3 abr. 2024. DOI: 10.59717/j.xinn-mater.2024.100062. Disponível em: <https://www.the-innovation.org/article/doi/10.59717/j.xinn-mater.2024.100062>. Acesso em: 27 ago. 2025.