

Lignin for the development of sustainable packaging

**RUMO A EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS: O PAPEL DA LIGNINA NA
QUÍMICA VERDE**

Renan H. S. Fernandes^{a,b,*}, Denise F. S. Petri^a

^aDepartamento de Química Fundamental, Instituto de Química, Universidade de São Paulo
(USP), São Paulo, SP, Brazil

^bInstituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, SP, Brazil

*e-mail: renanhenriqued@gmail.com

Resumo: A crescente preocupação ambiental gerada pelo descarte inadequado de embalagens convencionais impulsiona a busca por alternativas sustentáveis. Nesse contexto, a lignina emerge como um recurso promissor, sendo o segundo biopolímero mais abundante na natureza e um coproduto subutilizado das indústrias de papel, celulose e bioetanol. As propriedades intrínsecas do material, tais como ação antimicrobiana, capacidade antioxidante, barreira à radiação UV, reforço mecânico, barreira a gases e umidade, térmica e biodegradável, tornam-no apto para substituir polímeros derivados de petróleo. A metodologia empregada na extração influencia as características do material, sendo o processo Kraft o de maior volume de produção. A lignina pode ser incorporada a polímeros por meio de técnicas como *casting*, revestimento, extrusão e moldagem, oferecendo vantagens funcionais. Todavia, desafios como a heterogeneidade estrutural, dispersão, coloração e regulamentação devem ser superadas para viabilizar sua aplicação em larga escala. As perspectivas futuras incluem a otimização de custos, padronização, funcionalização e integração em embalagens inteligentes, demandando colaboração interdisciplinar entre indústria e órgãos reguladores. Dessa forma, a valorização da lignina configura-se como um avanço significativo para a economia circular e a química verde, promovendo a sustentabilidade na produção de embalagens biodegradáveis.

Palavras-chave: Lignina; biopolímeros; embalagens sustentáveis.

TOWARDS SUSTAINABLE PACKAGING: THE ROLE OF LIGNIN IN GREEN CHEMISTRY

Abstract: The increasing environmental concern engendered by the improper disposal of conventional packaging is driving the search for sustainable alternatives. In this context, lignin has emerged as a promising resource, being the second most abundant biopolymer in nature and an underutilized co-product of the paper, pulp and bioethanol industries. The intrinsic properties of lignin, such as antimicrobial activity, antioxidant capacity, UV radiation barrier, mechanical reinforcement, gas and moisture barrier, thermal stability, and biodegradability, make it suitable to replace petroleum-derived polymers. The material's intrinsic properties include the following: it is antimicrobial, antioxidant, a UV radiation barrier, mechanically reinforced, a gas and moisture barrier, and thermally and biodegradable. Collectively, these properties render it a suitable replacement for petroleum-based polymers. The characteristics of the material are influenced by the extraction method employed; the Kraft process is the most prolific in terms of production volume. Lignin can be incorporated into polymers through various techniques, including casting, coating, extrusion, and injection molding, thereby offering functional advantages. Nevertheless, challenges such as structural heterogeneity, dispersion, coloring, and regulation must be surmounted if its large-scale application is to be realized. The future outlook for this field is promising, with potential avenues for exploration including cost optimization, standardization, functionalization, and integration into smart packaging. This ambitious undertaking necessitates a collaborative effort between industry and regulatory bodies, demanding interdisciplinary expertise and cooperation. Consequently, the valorization of lignin signifies a substantial advancement for the circular economy and green chemistry, thereby promoting sustainability in the production of biodegradable packaging.

Keywords: Lignin; biopolymers; sustainable packaging.

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o acúmulo de resíduos e a poluição gerada por materiais de embalagem convencionais, majoritariamente derivados de fontes não renováveis, como o petróleo, tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis e biodegradáveis.¹ Nesse contexto, a lignina, uma macromolécula natural abundante encontrada nas paredes celulares das plantas e considerada a segunda mais presente na natureza, superada apenas pela celulose,² emerge como uma promissora matéria-prima para o desenvolvimento de embalagens alinhadas com os princípios da química verde.

A lignina (Figura 1) é um subproduto significativo da indústria de papel e celulose, sendo gerada em larga escala durante os processos de obtenção da celulose, assim como na produção de etanol de segunda geração. Apesar de sua vasta disponibilidade, grande parte da lignina produzida é atualmente utilizada para geração de energia por meio da queima, o que representa uma subutilização de seu potencial como fonte de materiais de maior valor agregado.³

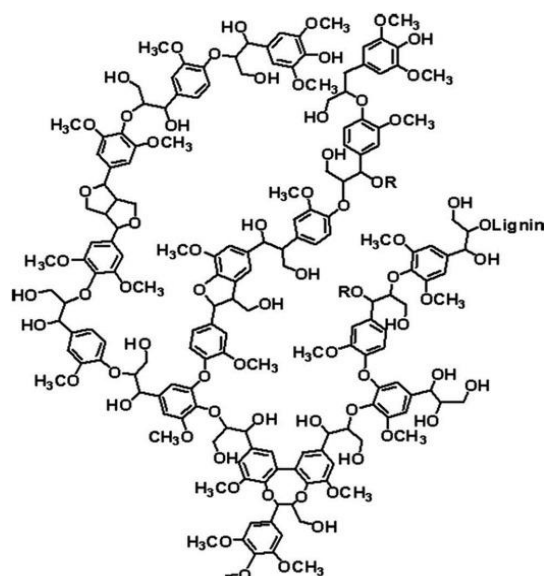


Figura 1. Estrutura molecular da lignina. Adaptado de Ribeiro et al. (2023)⁴

A lignina, devido à sua versatilidade, pode ser integrada a diversas matrizes poliméricas, tanto de origem renovável quanto sintética e biodegradável, para a produção de filmes e compósitos com funcionalidades aprimoradas. Tal característica pode resultar em melhorias das propriedades mecânicas e de barreira a gases. Além disso, a lignina pode conferir atividade antioxidante e proteção contra radiação ultravioleta (UV), características importantes para aplicações em embalagens.⁵

A valorização da lignina para a produção de filmes e outros materiais de embalagem é uma estratégia relevante dentro da química verde, pois utiliza um recurso renovável e subaproveitado, reduzindo a dependência de polímeros sintéticos derivados de petróleo.⁶

Esta revisão tem como objetivo analisar o uso da lignina como base para a criação de materiais de embalagem sob a ótica da química verde, abrangendo estratégias de incorporação da lignina, como a formação de biofilmes e nanocompósitos, além de investigar como a estrutura e propriedades da lignina influenciam as características dos materiais finais. Serão também abordados os desafios e as oportunidades para a implementação em larga escala de embalagens à base de lignina, com foco em critérios de desempenho, segurança e sustentabilidade.

PROCESSOS PARA EXTRAÇÃO DE LIGNINA

A lignina, cujo nome deriva do termo latino *lignum* ("madeira"), é uma substância amorfa e com grande presença de anéis aromáticos, caracterizada por uma estrutura molecular complexa, amplamente presente em tecidos vegetais. Sua função inclui o transporte de água e nutrientes, a proteção contra microrganismos e o fortalecimento estrutural das plantas.⁷ Além disso, contribui para a formação da lamela média, facilitando a adesão entre fibras celulares. É a segunda fonte de carbono mais abundante no ambiente, ficando atrás apenas da celulose, e se apresenta na planta como uma rede molecular amorfa, tridimensional, que pode variar dependendo do filo da planta.⁸

A Tabela 1 apresenta as faixas das frações de celulose, hemicelulose e lignina que compõem algumas biomassas vegetais

Tabela 1. Composição das frações de celulose, hemicelulose e lignina presentes em diferentes biomassas

Biomassa vegetal	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Referência
<i>Miscanthus</i> spp.	45-52	24-33	9-13	9
<i>Panicum virgatum</i>	32-37	26-33	17-18	10
Palha do milho	37	31	18	11
Bagaço de cana-de-açúcar	35-50	25-35	10-25	12
Eucalipto	39-46	24-28	29-32	13
<i>Pinus</i> spp.	46	23	28	14

Fonte: Autor.

Métodos de extração de lignina

A extração da lignina de materiais lignocelulósicos é realizada em condições que promovem sua degradação progressiva, resultando em fragmentos de menor massa molar e alterações em suas propriedades físico-químicas. Dessa forma, tanto a origem da lignina quanto o método empregado em sua extração exercem influência significativa sobre sua composição e características estruturais.¹⁵ A tecnologia para o isolamento de lignina da biomassa já não é mais o principal obstáculo para sua valorização. Quatro dos principais processos industriais estão produzindo lignina de alta pureza são: sulfito, soda, Kraft e organosolv,¹⁶ como representado no Figura 2.

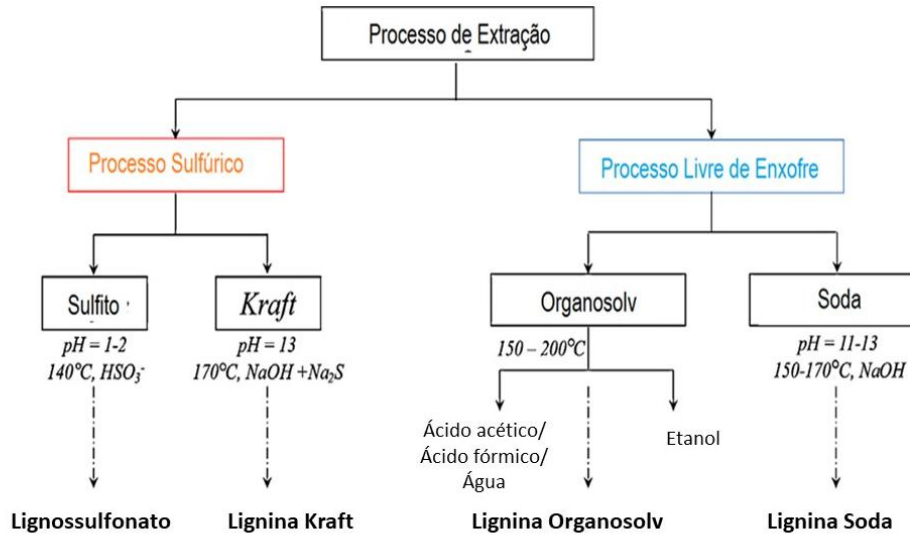


Figura 2. Diferentes processos de deslignificação de biomassa. Adaptado de Laurichesse e Avérous (2014)¹⁶

A Figura 3 apresenta os processos de cozimento mais utilizados para obtenção de fibras de celulose proveniente de madeiras, processo Kraft, processo sulfito e processo organosolv.

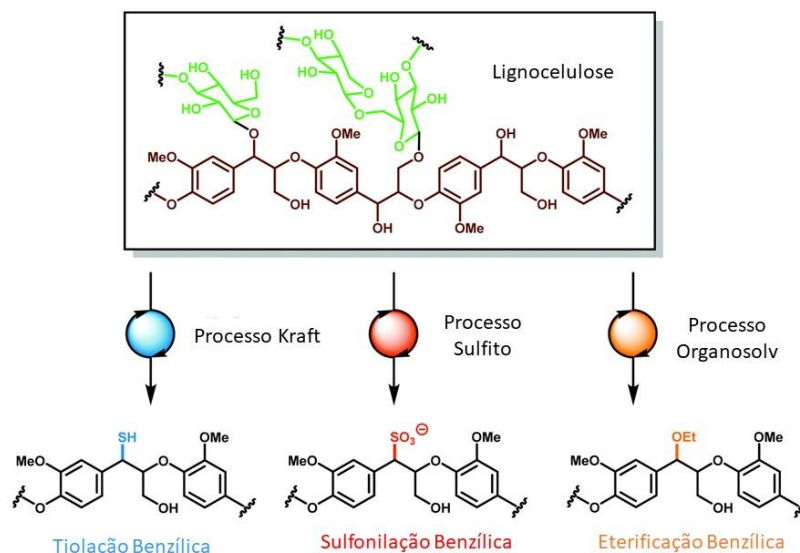


Figura 3. Processo de deslignificação da madeira pelos métodos Kraft, sulfito e organosolv; e suas respectivas ligninas. Adaptado de Kärkäs et al. (2016)¹⁷

Processo sulfito (lignossulfonatos)

O processo sulfito, a madeira picada é tratada com uma solução aquosa de bissulfito (HSO_3^-) (geralmente de cálcio, sódio, magnésio ou amônio) em meio ácido. A lignina presente na parede celular reage com os íons bissulfito, formando grupos sulfonatos ($-\text{SO}_3^-$) que tornam a lignina solúvel em água. Isso permite separar a lignina da celulose durante o cozimento. Essa introdução de grupos sulfonatos confere à lignina uma carga aniônica e, conseqüentemente, uma alta solubilidade em água, o que é a característica distintiva dos lignossulfonatos. Após a digestão da madeira, a lignina sulfonada é solubilizada no licor de polpação, resultando no licor de sulfito residual ou licor de sulfito gasto. Este licor contém, além dos lignossulfonatos, açúcares (xilose, glicose, manose), ácidos orgânicos e outros subprodutos da hemicelulose. Os lignossulfonatos são então recuperados por diferentes métodos, como precipitação, ultrafiltração ou osmose inversa, e purificados para as aplicações desejadas.¹⁸

Processo Kraft: obtenção e aplicações

A lignina Kraft é um subproduto industrial gerado em larga escala durante o processo de polpação Kraft, que é o método predominante globalmente para a produção de pasta de celulose com alta resistência mecânica, utilizada na fabricação de papel e outros produtos celulósicos. A matéria-prima para a polpação Kraft é tipicamente madeira, proveniente tanto de coníferas (*softwoods*), como pinus e abetos, quanto de folhosas (*hardwoods*), como eucalipto e bétula, embora outras biomassas lignocelulósicas, como o bagaço de cana, também possam ser utilizadas.¹⁹ Esse processo utiliza hidróxido de sódio e sulfeto de sódio (licor branco) sob condições alcalinas fortes para clivar as ligações éter presentes na estrutura de ligninas. O processo de deslignificação também ocorre em altas temperaturas (150 °C a 170 °C).²⁰ A Figura 4 apresenta o mecanismo da reação de despolimerização da lignina, pelo método Kraft.

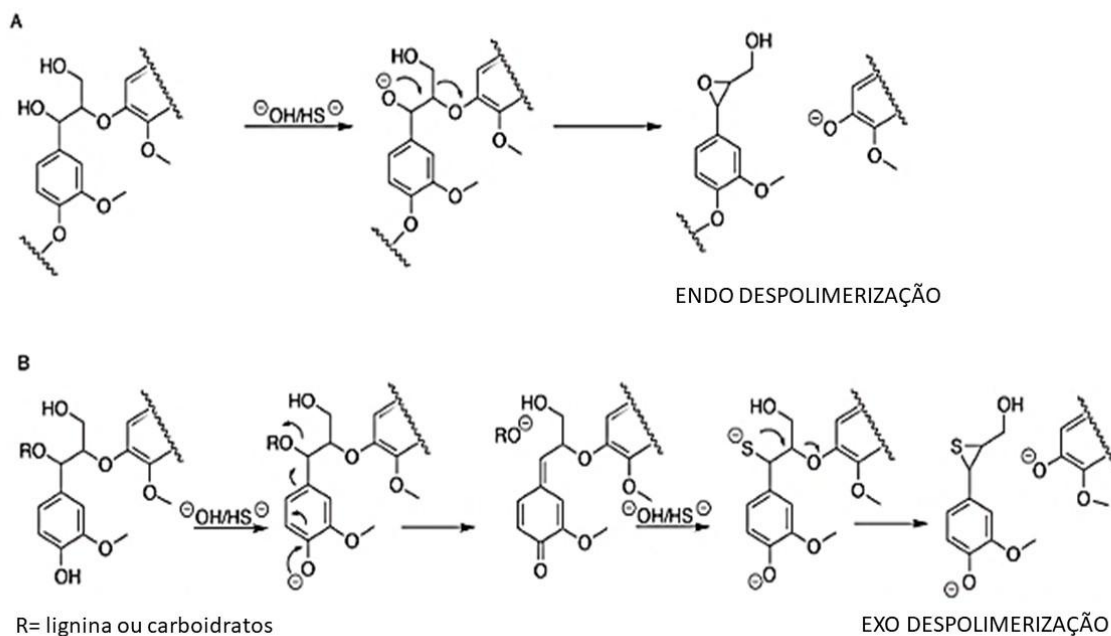


Figura 4. Mecanismo da despolimerização da lignina, pelo método Kraft. Adaptado de Argyropoulos et al. (2023)²⁰

A lignina pode ser recuperada do líquido após extração alcalina remanescente de celulose, o licor negro, baixando o pH deste para valores entre 5 e 7,5 com ácido (normalmente, ácido sulfúrico) ou com Dióxido de Carbono (CO₂).²¹

A maior parte da lignina Kraft é utilizada como fonte de combustível nas fábricas, onde é separada da celulose e da hemicelulose. Etapas adicionais podem ser implementadas para isolar a lignina Kraft do licor negro, com a maioria dos solventes utilizados no processo de polpação sendo recuperados do licor negro restante por meio de extração.

Os processos *LignoBoost* e *LignoForce* são as duas principais tecnologias comerciais para precipitar a lignina de licores usados. O processo *LignoBoost* foi desenvolvido pela *Chalmers University of Technology* e pela *Innventia*, na Suécia e baseia-se na acidificação do licor negro após a filtragem utilizando CO₂. Com a diminuição do pH com CO₂, a lignina precipita do

licor negro, posteriormente é desidratada utilizando um filtro-prensa e, em seguida, re-suspensa em água acidificada. A lama resultante é, mais uma vez filtrada e lavada, produzindo uma lignina de alta pureza.²² Já o processo *LignoForce* desenvolvido pela *FPIInnovations* e pela *NORAM Engineering*, ambas no Canadá, utiliza uma etapa adicional de oxidação prévia que visa mitigar a formação de compostos de enxofre reduzido total, que são odoríferos e podem ser liberados em pHs mais baixos. De acordo com a *FPIInnovations*, a lignina extraída do licor negro das fábricas de celulose Kraft utilizando o processo *LignoForce* custa aproximadamente US\$ 600/tonelada.²³

Processo por soda

O processo de deslignificação por soda consiste no uso de hidróxido de sódio para dissolver a lignina presente em materiais lignocelulósicos, possibilitando sua recuperação por meio de etapas como precipitação ácida, maturação e filtração. Esse método resulta na obtenção de lignina livre de enxofre. Em fontes não madeireiras, entretanto, a recuperação da lignina-soda mostra-se mais complexa em virtude do elevado teor de ácido carboxílico, gerado pela oxidação de grupos hidroxilo alifáticos, o que confere à substância propriedades dispersantes. Para que a filtragem seja viabilizada, é necessário o aquecimento, que favorece a coagulação e torna o material mais facilmente separável.²²

Processo Organosolv

Os solventes orgânicos, tais como etanol, ácido fórmico, ácido acético e metanol, são empregados no processo de deslignificação denominado *organosolv*. Em comparação com a lignina sulfonada e a lignina Kraft, a lignina *organosolv* apresenta vantagens significativas, incluindo a ausência de enxofre, uma maior capacidade de derivação, um teor de cinzas reduzido, uma pureza superior devido à diminuição do teor de carboidratos, uma massa molar geralmente menor e uma menor polaridade.²⁵

APLICAÇÕES DA LIGNINA NO DESENVOLVIMENTO DE EMBALAGENS

As embalagens de base biológica, elaboradas a partir de materiais sustentáveis como biopolímeros, têm sido amplamente estudadas no setor de embalagens alimentícias devido ao seu potencial para reduzir o impacto ambiental associado aos plásticos sintéticos. Essas alternativas visam não apenas minimizar a dependência de polímeros convencionais, mas também fomentar soluções biodegradáveis que promovam a sustentabilidade e a diminuição de resíduos plásticos.²⁶

Os biopolímeros, compostos por polissacarídeos, proteínas e poliésteres sintéticos biodegradados, destacam-se por sua biodegradabilidade e baixo impacto ambiental. Além disso, formulações de revestimento podem ser desenvolvidas a partir de polímeros sustentáveis, como a celulose, contribuindo significativamente para a conservação dos alimentos e a redução do desperdício.²⁷ Entre os materiais considerados para embalagens ecológicas, a lignina tem sido explorada como um recurso viável, sendo utilizada no desenvolvimento de embalagens ativas, inteligentes e revestimentos funcionais ou comestíveis.²⁸

A lignina, por sua natureza renovável, tem sido amplamente estudada nos últimos anos para aplicações industriais sustentáveis.²⁹ Entre suas principais utilizações destacam-se a fabricação de termoplásticos, termofixos, cargas e compostos, além da sua incorporação em misturas poliméricas. O avanço dessas pesquisas visa expandir o aproveitamento desse biopolímero, promovendo alternativas ecológicas para diversos setores.³⁰ Além disso, suas propriedades intrínsecas a tornam uma candidata promissora para substituir produtos químicos, polímeros e derivados fósseis. Seu caráter polifenólico confere capacidades antioxidantes e de eliminação de radicais, tornando-a valiosa como estabilizadora de UV e antioxidante quando combinada a outros materiais.³¹ A lignina também pode atuar como reforço mecânico, melhorando a resistência à tração, propriedades de barreira e o alongamento na ruptura dos polímeros, ampliando seu potencial de aplicação industrial.³²

A Tabela 2 apresenta um compilado com diversos trabalhos que utilizam a lignina no desenvolvimento de embalagens *bio-based*.

Tabela 2. Uso da lignina para desenvolvimento de embalagens. Adaptado de Priyadarshi *et al.* (2024)²⁸

Materiais	Propriedades	Aplicações	Ref.
Lignina Quitosana	Atividade antimicrobiana Reforço mecânico Barreira anti-UV	Embalagem ativa para alimentos	33
Poli(ácido lático) (PLA) Lignina	Atividade antirradical Reforço mecânico Barreira anti-UV Propriedades de barreira Estabilidade térmica	Embalagem ativa para alimentos	34
Lignina Quitosana Fibra de rami	Resistência à água Reforço mecânico Estabilidade térmica	Embalagem para alimentos	35
Amido de sagu Lignina	Atividade antioxidante Reforço mecânico Barreira anti-UV Propriedades de barreira Propriedade termomecânica	Embalagem para alimentos	36
Goma gelana Hidroxietyl celulose Lignina	Atividade antioxidante Reforço mecânico Barreira anti-UV Propriedades de barreira Propriedade termomecânica	Embalagem para alimentos	37
PLA Nanocristais de celulose (CNC) Nanopartículas de lignina	Atividade antimicrobiana Reforço mecânico Estabilidade térmica	Embalagem antimicrobiana para alimentos	38
Nanocristais de celulose Nanopartículas de lignina	Estabilidade térmica Absorção de radiação UV	Embalagem inteligente para alimentos	39
PBAT Lignina ZnO	Atividade antimicrobiana Reforço mecânico Barreira anti-UV Atividade antioxidante	Embalagem ativa para alimentos	40
Lignina Tanino Nanopartículas de ZnO	Atividade antimicrobiana Reforço mecânico Barreira anti-UV Estabilidade térmica	Embalagem celulósica verde	41
Amido termoplástico Lignina de casca de nozes	Atividade antioxidante Barreira anti-UV Barreira contra oxigênio	Embalagem para alimentos gordurosos	42
Amido Nanopartículas de lignina	Atividade antioxidante Barreira anti-UV Barreira contra oxigênio Reforço mecânico	Embalagem para preservação de óleo	43

Propriedades antimicrobianas

A lignina apresenta propriedades antimicrobianas elevadas, entretanto, a extensão dessa atividade depende da fonte de lignina e da técnica de extração empregada.⁴⁴ Segundo Chen *et al.* (2020)⁴⁵, a lignina tem a capacidade de romper a membrana celular bacteriana, causando sua desorganização e consequente perda de funcionalidade.⁴⁶ Seu mecanismo antimicrobiano é comparável ao dos óleos essenciais, onde a degradação da membrana celular protetora compromete os processos de biossíntese e a integridade bacteriana. Esse efeito resulta na redução da viabilidade celular e pode levar à morte de bactérias.⁴⁷

A lignina é constituída por monolignóis, tais como hidroxifenil, guaiacil e siringil, que são originados de compostos precursores específicos: *p*-hidroxifenil de álcool *p*-cumarílico, guaiacil de álcool coniferílico e siringil de resíduos de álcool sinapílico.⁴⁸ Conforme demonstrado na Figura 5, os precursores em questão desempenham um papel fundamental na atividade antimicrobiana da lignina.

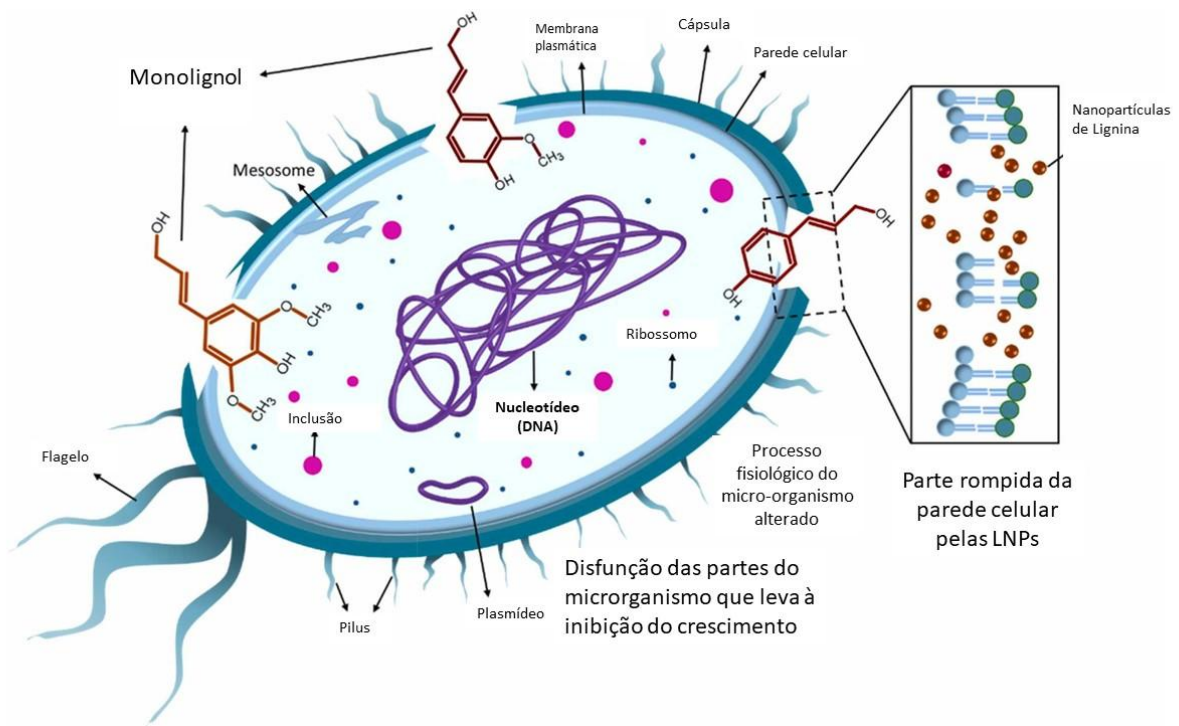


Figura 5. Mecanismo da atividade antimicrobiana da lignina. Adaptado de Hararak et al. (2002)⁴⁹

A atividade antibacteriana da lignina, extraída de diferentes fontes e métodos, tem sido amplamente investigada, especialmente contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, incluindo patógenos alimentares, como *Escherichia coli* e *Listeria monocytogenes*.⁵⁰ Estudos demonstram que os compostos polifenólicos da lignina apresentam maior eficácia contra bactérias Gram-positivas, enquanto seu efeito sobre bactérias Gram-negativas é mais limitado. A atividade antimicrobiana da lignina varia conforme a cepa bacteriana e o método de extração empregado. A lignina Kraft, devido ao seu caráter mais apolar, exibe um potencial antibacteriano mais elevado em comparação com a lignina organosolv. Esta diferença deve-se à capacidade de interação com os componentes lipídicos e proteicos da membrana, resultando num aumento da permeabilidade. Esta permeabilização resulta no vazamento de constituintes celulares essenciais, tais como íons, ATP, proteínas e material genético, ocasionando um desequilíbrio osmótico e, potencialmente, a lise celular.⁵¹

Estudos recentes reportaram a atividade antimicrobiana da lignina incorporada em polímeros de origem biológica, reafirmando seu potencial como uma alternativa sustentável às nanopartículas de prata em virtude de seu menor impacto ambiental.⁵² A lignina derivada da farinha de faia (BWL) mostrou-se eficaz na inibição do crescimento de *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*, equiparando-se a agentes antibacterianos convencionais, como bronopol e clorexidina. Ademais, a BWL pode substituir a prata em filmes de polietileno (PE) sem comprometer significativamente suas propriedades mecânicas, indicando uma boa aplicação em embalagens para contato com alimentos.⁵³

Em comparação com os antimicrobianos metálicos, os compostos antimicrobianos orgânicos, tais como a lignina, apresentam-se mais adequados em virtude de sua menor toxicidade e ausência de acúmulo no meio ambiente. Além disso, a lignina se destaca como um dos principais componentes antibacterianos naturais, oferecendo propriedades biodegradáveis promissoras para o controle de micro-organismos patogênicos humanos.⁵⁴

Apesar do expressivo potencial, as tecnologias fundamentadas na lignina encontram-se em estágio inicial, e materiais contendo lignina ainda não são amplamente utilizados na produção de itens de alta qualidade. No âmbito das embalagens para alimentos, a lignina tem sido estudada como alternativa para reduzir a proliferação de bactérias patogênicas de origem alimentar e aumentar a vida útil dos produtos.⁵⁵

Propriedades antioxidantes

A ação antioxidante da lignina é atribuída às suas estruturas fenólicas, que contêm radicais reativos de oxigênio. Os grupos hidroxílicos fenólicos da lignina são excelentes doadores de hidrogênio (H) e elétrons (e^-) para radicais livres instáveis, como radicais peróxido, hidroxila e superóxido. Ao doar um átomo de hidrogênio, a lignina neutraliza o radical livre, transformando-o em uma espécie mais estável e, por sua vez, formando um radical fenólico de lignina. Esse radical de lignina pode ser estabilizado por ressonância dentro da estrutura aromática ou reagir com outros radicais, interrompendo a cadeia de reações de oxidação.⁵⁶ A

fonte e o método de extração impactam a composição e, conseqüentemente, a capacidade antioxidante. Ligninas com maior teor de grupos fenólicos livres geralmente exibem maior atividade.⁵⁷

A lignina, devido à sua estrutura fenólica natural, apresenta-se como um eficiente eliminador de radicais livres. Conforme demonstrado por Ponomarenko *et al.* (2015)⁵⁸, diversos tipos de lignina técnica apresentam atividade antioxidante superior à do fenilpropanoide curcumina, um antioxidante amplamente reconhecido. A Figura 6 apresenta os resultados de capacidade antioxidante de diversas ligninas quando adicionadas em filmes de celulose transparente, apresentados por Guo *et al.* (2019).¹¹⁸

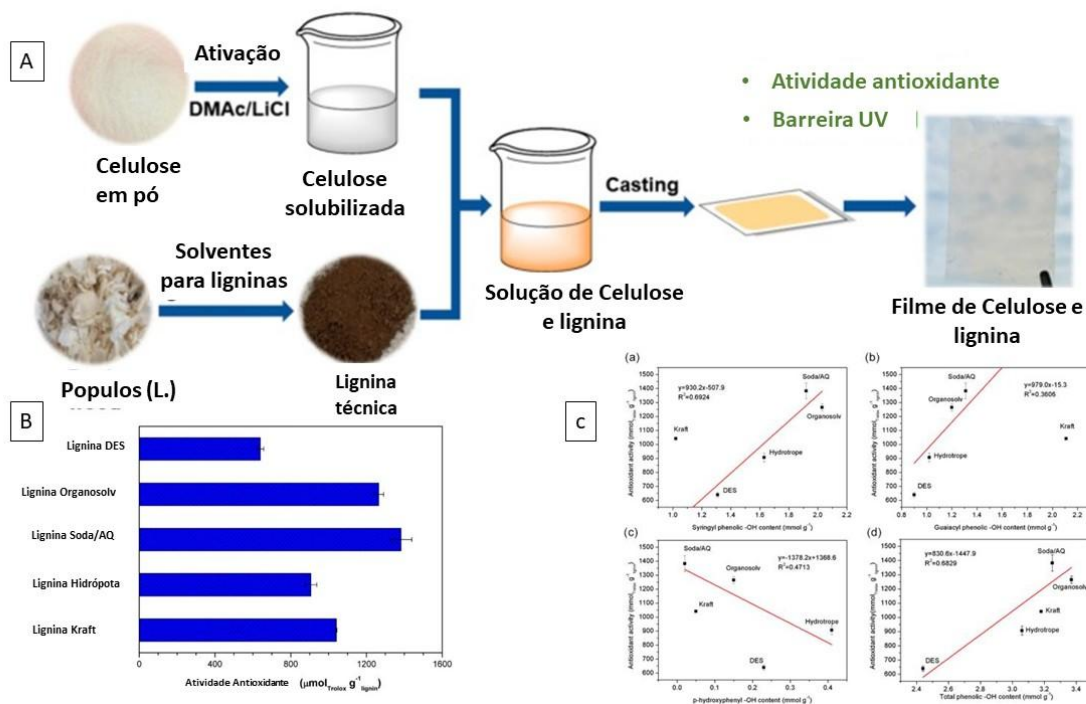


Figura 6. Avaliação de capacidade antioxidantes de ligninas em filme celulósico, onde: (a) Esquema de produção do filme celulose/lignina; (b) Capacidade da atividade antioxidante de diferentes ligninas e (c) Relação entre hidroxilas presentes nas diferentes ligninas com sua capacidade como antioxidante. Adaptado de Guo *et al.* (2019)¹¹⁸

A lignina também pode atuar como um agente redutor, doando elétrons para reduzir espécies oxidativas, como peróxidos de hidrogênio e hidroperóxidos lipídicos. Essa capacidade de reduzir intermediários da oxidação contribui para prevenir a formação de novos radicais livres e desacelerar o processo oxidativo geral. Além disso, os radicais fenoxila da lignina, que apresentam maior atividade antioxidante, podem atuar como antioxidantes secundários, reagindo com radicais livres para reforçar sua estabilidade química.⁵⁹

A embalagem ativa tem sido utilizada como reservatório para a liberação controlada de substâncias funcionais, complementando estratégias como revestimentos comestíveis, embalagens de atmosfera modificada e removedores de oxigênio. Com a crescente adoção de antioxidantes sintéticos para conservação de alimentos e estabilização de materiais poliméricos, o interesse por alternativas naturais, especialmente os polifenóis, também aumentou em razão de sua biodegradabilidade e menor toxicidade. Dentre os antioxidantes naturais, a lignina se destaca como um polifenol polimérico bio-renovável, apresentando maior resistência térmica e massa molar superior em comparação a antioxidantes de baixa massa molar, como o tocoferol, frequentemente utilizados na estabilização de polímeros.⁶⁰

Propriedades de barreira à radiação UV

A lignina possui propriedades intrínsecas de absorção de luz nas regiões do ultravioleta (UV) e do visível. Grupos funcionais como α -carbonila, bifenila e duplas ligações conjugadas viabilizam a absorção de UV⁶¹, enquanto grupos carbonila conjugados, anéis aromáticos e duplas ligações carbono-carbono, quando conjugados, são responsáveis pela absorção de luz visível.⁶² Essas características conferem à lignina uma coloração variável, que pode apresentar tonalidades claras ou marrom-escuro.

Apesar de sua utilidade, a absorção de UV pela lignina pode comprometer a transparência de materiais, causando escurecimento de filmes de embalagem e fotoamarelamento.⁴⁹ Os anéis aromáticos presentes em sua estrutura química absorvem e bloqueiam a radiação ultravioleta, impedindo sua passagem. A lignina é particularmente eficaz na absorção de radiações UVA

(320–400 nm) e UVB (280–320 nm), protegendo contra os efeitos prejudiciais dessa exposição em organismos vivos, incluindo seres humanos.²⁸

A degradação induzida pela luz pode comprometer a qualidade dos produtos alimentícios, causando desbotamento de cor, perda de nutrientes e formação de substâncias indesejáveis.⁶³

Embora a transparência das embalagens seja valorizada pelos consumidores, ela nem sempre é vantajosa para a proteção dos alimentos. Produtos sensíveis à luz, como laticínios, podem sofrer oxidação lipídica ou alteração de cor, exigindo embalagens opacas para minimizar esses efeitos.⁶⁴

A Figura 7 mostra uma representação conceitual das alterações da lignina para a fabricação de um produto bloqueador de UV à base de lignina.

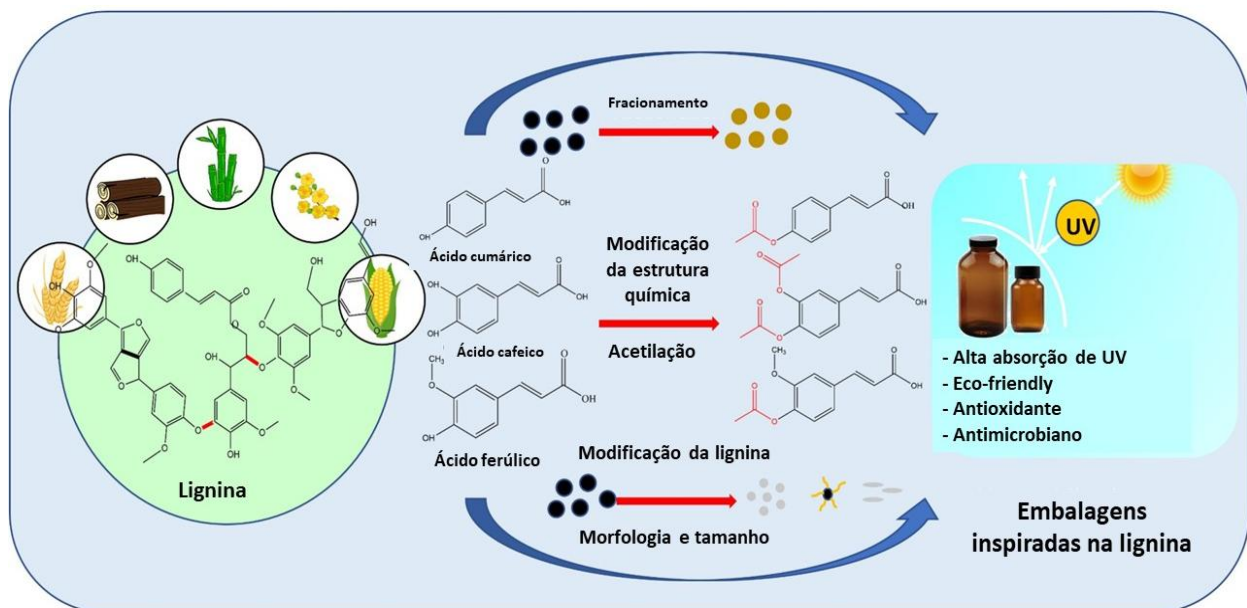


Figura 7. Representação esquemática das alterações de lignina para produção de uma embalagem de bloqueio de UV à base de lignina. Adaptado de Anushikha e Gaikwad (2024)⁶⁵

A escolha entre transparência e opacidade depende da aplicação. Enquanto a opacidade resulta do tamanho das partículas dispersas em uma matriz polimérica, partículas maiores que o comprimento de onda da luz visível bloqueiam a luz, a cristalinidade e as propriedades de

superfície influenciam a transparência óptica dos materiais semicristalinos. A perda de transparência ocorre devido à dispersão superficial da luz ao atravessar regiões amorfas e cristalinas.⁶⁶

A aparência visual das embalagens influencia diretamente a decisão de compra dos consumidores, tornando a coloração marrom dos filmes incorporados com lignina um desafio para sua aceitação e aplicação comercial de alto valor agregado. Para mitigar esse efeito, Izaguirre *et al.* (2020)⁶⁷ investigaram a absorção de UV em filmes de quitosana/lignina, demonstrando que o fracionamento da lignina Kraft e organosolv pode minimizar o escurecimento, sendo que a lignina organosolv resulta em menor alteração na luminosidade da cor.

Entretanto, métodos de branqueamento têm sido explorados para tornar a lignina mais viável para aplicações estéticas. De acordo com Wang *et al.* (2016)⁶⁸, a lignina industrial pode ser branqueada por irradiação UV em tetrahidrofurano. Já Zhang *et al.* (2017)⁶⁹ demonstraram que uma solução de metanol/água a 80% pode clarear frações de lignina kraft de eucalipto com menor massa molar. Essas abordagens podem ser empregadas para reduzir a coloração escura da lignina, tornando sua incorporação em polímeros de base biológica mais atraente para aplicações em embalagens visivelmente aceitáveis.

Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são fundamentais para definir a aplicabilidade de um material, influenciando sua durabilidade durante o processamento, manuseio e armazenamento de produtos embalados. No contexto das embalagens, os materiais devem apresentar características como elasticidade, resistência à tração e compressão, resistência ao impacto e fragilidade controlada, garantindo proteção mecânica eficiente aos produtos. Dessa forma, a análise das propriedades mecânicas é um aspecto crucial no desenvolvimento de embalagens destinadas à conservação e segurança dos alimentos.⁴⁹

A resistência mecânica limitada dos polímeros de base biológica tem motivado o desenvolvimento de reforços para melhorar suas propriedades estruturais. Embora fibras sintéticas, como vidro, carbono e boro, ofereçam alta resistência e rigidez, sua não biodegradabilidade representa um desafio ambiental.⁷⁰ Em contrapartida, a lignina tem sido amplamente estudada como agente de reforço sustentável, devido à sua biodegradabilidade e disponibilidade abundante. Sua estrutura aromática contribui para a estabilidade térmica e mecânica dos polímeros de base biológica quando empregada em concentrações adequadas. Diversos estudos demonstram o potencial da lignina nesse contexto. Yang et al. (2019)⁷¹ reportaram melhorias na resistência mecânica de compósitos à base de amido, proteína, PLA e PHB. No entanto, concentrações acima de 0,25% em peso podem provocar dispersão irregular na matriz polimérica, limitando o aumento da resistência à tração e do módulo de Young, como observado em filmes de quitosana.⁷² De forma semelhante, estudos sobre compósitos de lignina de acácia-alginato indicaram que, ao elevar a concentração de lignina para 10% e 20%, a resistência à tração diminuiu para 0,495 MPa e 0,146 MPa, respectivamente, comparada aos 0,562 MPa do alginato puro. Essa redução pode ser atribuída ao efeito plastificante da lignina em altas concentrações e à presença de moléculas de água, que enfraquecem as forças intermoleculares entre as cadeias poliméricas.⁷³ Mostafa *et al.* (2024)⁷⁴ investigaram o uso da lignina como material de reforço em filmes biocompósitos à base de isolado de proteína de soja (IPS) para embalagens alimentícias sustentáveis. A incorporação de nanopartículas de lignina melhorou significativamente as propriedades mecânicas, térmicas e de barreira dos filmes. A adição de 20% de lignina resultou em um aumento expressivo na resistência à tração, atingindo 13,07 MPa, e no alongamento na ruptura, que chegou a 86,9%, quando comparados aos filmes de IPS controle. A lignina pode atuar como um reforço eficaz em polímeros, dissipando tensões externas por meio de interações entre partículas e matriz polimérica, o que favorece a melhoria das propriedades mecânicas. No entanto, sua adição pode ter efeitos variados, podendo ser benéfica ou, em alguns casos, prejudicial ao desempenho do material.³²

Yang *et al.* (2020)⁷⁵ observaram que a incorporação de LNP-g-P(LA-CL) em concentrações de 9% ou 12% não aumentou o alongamento na ruptura, resultando, ao contrário, em uma diminuição para 180% e 130%, respectivamente. Os autores sugeriram que esse material melhora a tenacidade do compósito PLA/PCL devido à maior compatibilidade interfacial entre as duas fases. Assim, os efeitos da lignina como reforço devem ser analisados caso a caso, considerando as características específicas de cada sistema polimérico para otimizar sua aplicação.

Propriedades de barreira

As propriedades de barreira desempenham um papel essencial na conservação de produtos embalados, protegendo-os contra contaminação externa e prolongando sua vida útil.³² As propriedades de barreira de um material podem ser definidas como sendo a proteção de produtos alimentícios dentro da embalagem, impedindo a entrada/saída de diferentes permeantes, como umidade (vapores de água), oxigênio, dióxido de carbono, gorduras e óleos (Figura 8).⁷⁶



Figura 8. As diferentes propriedades de barreira do material de embalagem. Adaptado de Mujtaba et al. (2022)⁷⁷

Materiais de embalagem com baixa permeabilidade ao vapor d'água (WVP) e ao oxigênio (PO) são considerados ideais para preservar os produtos de forma eficaz. Entretanto, polímeros de base biológica apresentam barreira de baixa a moderada contra o vapor d'água, enquanto polímeros de fontes renováveis tendem a oferecer proteção limitada contra gases, o que exige aprimoramentos para atender às exigências industriais.⁷⁸

A lignina tem se mostrado uma alternativa promissora para aprimorar as propriedades de barreira em embalagens de polímeros de base biológica. Seu impacto na permeabilidade ao vapor d'água e ao oxigênio pode variar de acordo com o sistema polimérico e a compatibilidade da lignina com a matriz polimérica.³²

Shankar et al. (2015)⁷⁹ observaram que a inclusão de até 10% de lignina em compósitos de ágar/lignina reduziu os valores de WPV, indicando uma melhora na barreira contra a umidade. Essa melhora é atribuída à forte interação molecular entre a lignina e o polímero, à dispersão

homogênea da lignina na matriz e ao aumento do caminho tortuoso para a difusão do vapor d'água. Entretanto, estudos como o de Núñez-Flores *et al.* (2012)⁸⁰ mostram que essa eficácia não é universal e precisa ser avaliada para cada sistema polimérico.

Com relação à barreira contra o oxigênio, os efeitos da lignina também podem variar. No estudo de Crouvisier-Urien *et al.* (2016)⁸¹, a PO do filme de quitosana puro aumentou com a adição de 20% de lignina, sugerindo que a lignina pode desestabilizar a rede polimérica e comprometer a barreira contra O₂. Por outro lado, Kovalcik *et al.* (2015)⁷⁸ observaram que a PO do poli(3-hidroxi-butirato-co-3-hidroxi-valerato) (PHBHV) diminuiu com a adição de 10% (m/m) de lignina Kraft. Esse efeito foi atribuído à rigidez das partículas de lignina e à sua dispersão homogênea na matriz polimérica.

Em geral, a estrutura do material e sua cristalinidade influenciam a eficácia da lignina na barreira ao vapor d'água e ao oxigênio. A introdução de uma fase dispersa pode criar um caminho tortuoso para a difusão molecular, dificultando a passagem dos gases e da umidade.⁸² Além disso, em filmes mais cristalinos, as fases cristalinas desenvolvidas podem agir como barreiras adicionais, reduzindo a permeabilidade do material. Portanto, a aplicação da lignina em embalagens precisa ser cuidadosamente ajustada conforme a matriz polimérica utilizada para otimizar suas propriedades de barreira.⁸³

Propriedades térmicas

A lignina apresenta características térmicas distintas, atuando tanto como termoplástico quanto como termofixo. Sua estrutura química complexa, aliada às ligações de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares, confere-lhe propriedades termoplásticas, embora sua limitada fluidez impeça seu uso como termoplástico puro.⁴⁹ Além disso, pesquisas indicam que a lignina pode formar estruturas reticuladas em temperaturas elevadas, como acima de 150 °C ou após aquecimento por 30 minutos a 173 °C, caracterizando um comportamento termofixo.⁸⁴ Essa dualidade térmica pode ser um dos fatores que restringem sua

aplicação isolada na fabricação de embalagens alimentícias, tornando sua combinação com outros polímeros uma estratégia necessária para otimização de propriedades mecânicas e térmicas.⁸⁵

As propriedades térmicas, como temperatura de decomposição (T_d) e temperatura de transição vítrea (T_g), são cruciais na determinação da aplicabilidade de materiais para embalagens. Devido à diversidade de seus grupos funcionais, a lignina se decompõe em uma ampla faixa de temperaturas, seguindo pelo menos duas vias de reação. Quando integrada por enxertia a polímeros, a lignina pode impactar significativamente suas características térmicas, elevando a T_g devido à presença de anéis aromáticos volumosos que restringem a mobilidade da cadeia polimérica.³² Chung *et al.* (2013)⁸⁶ relataram esse efeito ao desenvolver um copolímero PLA-lignina, observando um aumento da T_g proporcional ao teor de lignina. Além de suas propriedades térmicas, a lignina demonstra potencial como carreador de compostos voláteis termossensíveis, protegendo-os contra degradação durante o processamento de filmes ativos. No contexto de embalagens alimentícias, a temperatura de transição vítrea é um parâmetro essencial para definir os limites de uso do material sob diferentes condições de armazenamento e processamento térmico, incluindo pasteurização, fervura e esterilização. Compreender e otimizar as propriedades térmicas da lignina pode ampliar suas aplicações e melhorar sua funcionalidade em sistemas de embalagem.⁸⁷

Biodegradabilidade da lignina em embalagens

O uso de materiais biodegradáveis para embalagens alimentícias é uma estratégia essencial para mitigar impactos ambientais, mas os polímeros de base biológica frequentemente apresentam limitações em suas propriedades mecânicas e funcionais. A lignina surge como um reforço promissor, pois, além de ser naturalmente biodegradável, contém grupos funcionais capazes de aprimorar diversas características do material sem comprometer sua sustentabilidade.⁴⁹

A resistência da lignina à degradação microbiana está relacionada à sua função na parede celular vegetal, onde protege os carboidratos ao ataque de microrganismos. Sua estrutura química complexa, composta por ligações éter e C-C, dificulta a hidrólise, tornando sua decomposição um processo desafiador. No entanto, a degradação da lignina ocorre por meio de reações oxidativas, resultando na separação aleatória de grupos funcionais, cadeias laterais e anéis aromáticos.⁸⁸

Embora os fungos de podridão branca sejam os mais eficientes na hidrólise da lignina, sua ação é limitada durante a fase termofílica da compostagem. Por isso, os microfungos termofílicos desempenham um papel crucial na degradação da lignina. Além disso, actinomicetos e eubactérias podem solubilizar e modificar extensivamente a estrutura da lignina, contribuindo para acelerar sua decomposição por meio de interações sinérgicas entre diferentes microrganismos.⁸⁹

A incorporação de lignina em polihidroxialcanoatos (PHA) ou poli(álcool vinílico) (PVA) tem demonstrado efeitos positivos na biodegradabilidade desses materiais. Os polímeros à base de PHA são amplamente reconhecidos por sua capacidade de degradação ambiental, e a adição de lignina pode potencializar essa propriedade.⁹⁰ De forma semelhante, Korbag e Mohamed (2015)⁹¹ demonstraram que a lignina pode acelerar a biodegradação de filmes de PVA, avaliada por meio da perda de peso ao longo do tempo de enterro. Um filme de PVA/lignina na proporção de 1:30 apresentou perda de peso de 6,61% após 30 dias, enquanto um filme com razão de 4:30 mostrou uma redução menor de 3,84%.

Esses fatores indicam que a lignina pode ser aproveitada em compósitos biodegradáveis para embalagens, desde que seu impacto na biodegradabilidade do material seja cuidadosamente avaliado.

PROCESSOS DE INCORPORAÇÃO DE LIGNINA EM EMBALAGENS

Processo de obtenção de filme flexível por casting

O processo de formação de filme flexível por *casting* tem se destacado como método eficiente para a produção de filmes de polímeros termofixos, permitindo a solubilização uniforme do pré-polímero e do polímero em solventes como água, álcool ou compostos orgânicos.⁹² Comparado à moldagem por compressão a quente, esse processo, realizado em temperatura não tão elevada, minimiza a degradação dos compósitos poliméricos.⁹³ A lignina, dispersa na mesma solução ou separadamente, contribui para a melhoria das propriedades dos filmes poliméricos, aumentando sua repelência à água e funcionalidade estrutural.⁹⁴

A Figura 9 apresenta o processo de produção de filmes de lignina reforçados por CNC produzido por Halloub *et al.* (2022).³⁹

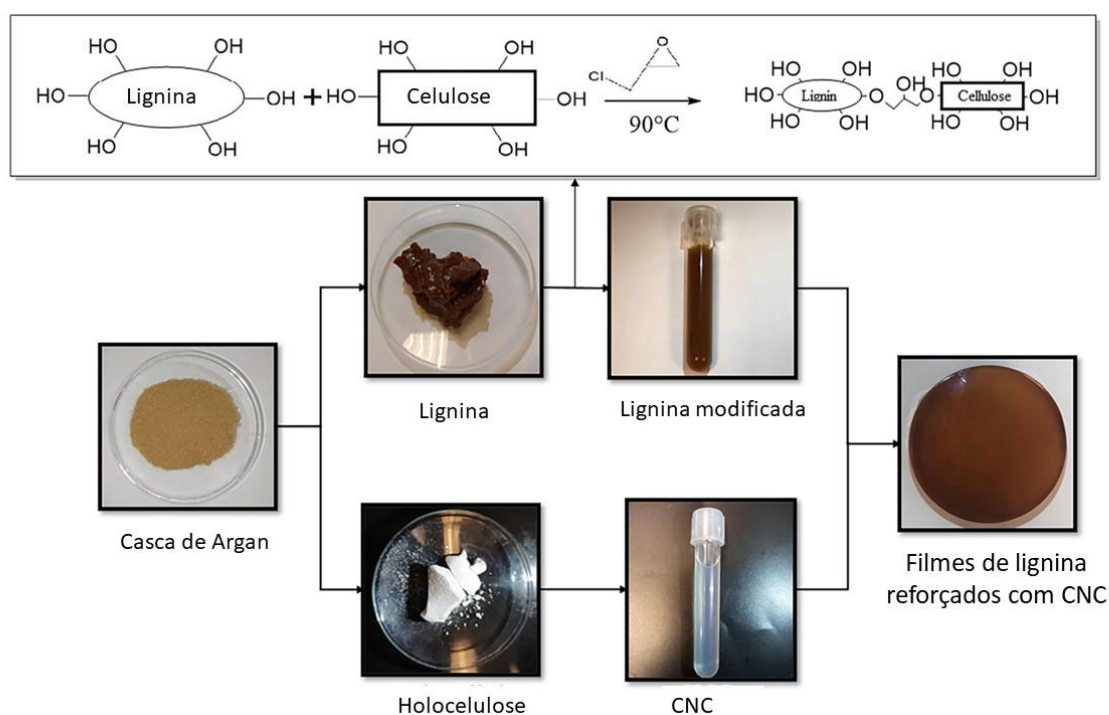


Figura 9. Preparação de filme de lignina modificado reforçado com CNCs.
Adaptado de Halloub *et al.* (2022)³⁹

Filmes de compósitos termoplásticos de amido, lignina e resíduos de casca de noz foram desenvolvidos para embalagens de alimentos gordurosos, promovendo proteção UV e barreira ao oxigênio, com a hidrólise ácida das cascas de noz aprimorando sua compatibilidade como

carga polimérica.⁹⁵ Zhang *et al.* (2020)⁹⁶ demonstraram que os grupos funcionais apolares da lignina contribuem significativamente para a repelência à água desses materiais.

Ji *et al.* (2022)³⁵ produziram filmes de quitosana reforçados com fibra de rami e lignina, obtendo melhorias de 41,2% na resistência à água e um aumento de 288% na atividade antioxidante. A formulação mais eficiente foi alcançada com 10% em peso de fibra de rami e 10% em peso de lignina, tornando os filmes compósitos adequados para embalagens de carne. A lignina tem sido explorada na fabricação de filmes de PLA, destacando-se por sua capacidade de barreira à umidade, aumentada em 73% com a lignina alcalina de baixa massa molar, sem comprometer a biocompatibilidade.⁹⁷ Chaubey *et al.* (2021)⁹⁸ investigaram a copolimerização de PLA/lignina e sua adição ao poli(álcool vinílico) (PVA), melhorando as propriedades de bloqueio de UV essenciais para evitar a oxidação lipídica em embalagens de alimentos.

Por fim, hidrogéis à base de lignina têm sido desenvolvidos para aplicações biomédicas e apresentam potencial para embalagens alimentícias, devido à sua capacidade de absorção e retenção de água, biocompatibilidade e difusão controlada de materiais desejáveis.⁹⁹

Processo de revestimento de embalagem

O uso de lignina no desenvolvimento de revestimentos para embalagens alimentícias tem sido amplamente estudado devido à sua capacidade de melhorar propriedades superficiais e funcionais dos materiais. Xie *et al.* (2021)¹⁰⁰ desenvolveram revestimentos compósitos contendo lignina (40%), tanino (15%) e nanopartículas de ZnO (10%), aplicados em papel para criar uma embalagem sustentável. O material resultante apresentou alta resistência mecânica, propriedades antibacterianas, estabilidade térmica e maior resistência à umidade, destacando-se como uma alternativa promissora para embalagens utilizadas em condições de alta umidade.

Tayeb *et al.* (2020)⁵ uma embalagem celulósica, em forma de cumbuca, revestida com uma camada de lignina e CNC (LCNC) que apresentou uma boa barreira contra permeação de óleos. A Figura 10 apresenta o resumo esquemático da produção desta embalagem.

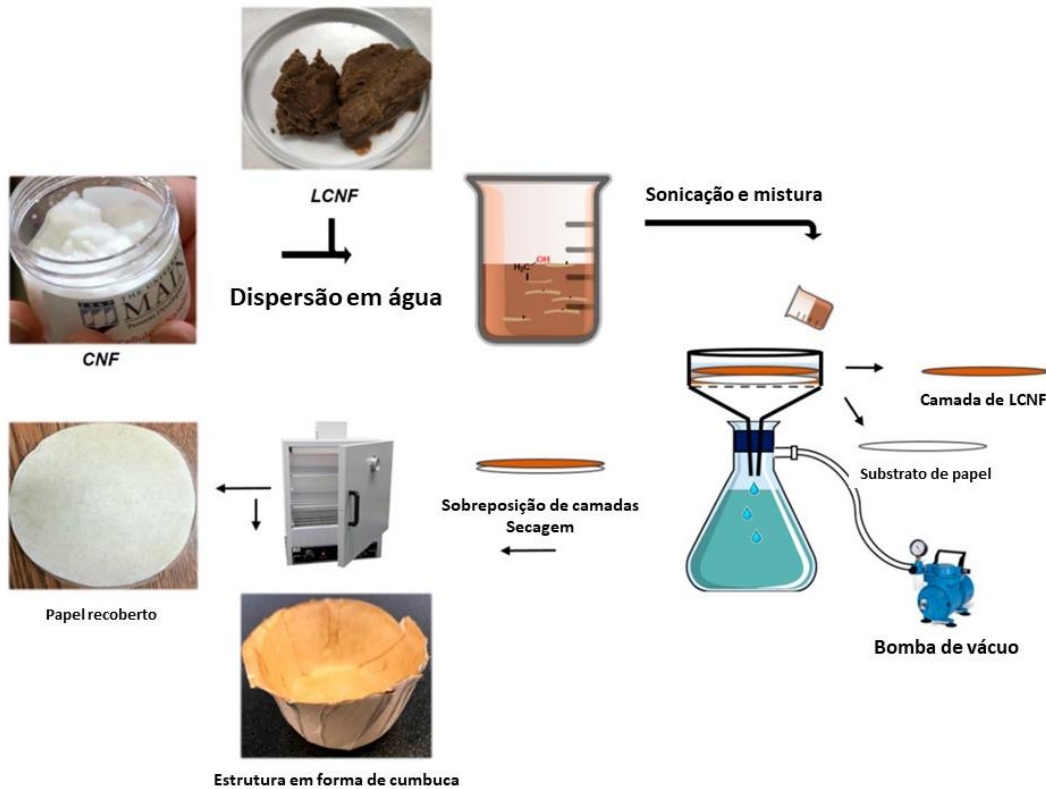


Figura 10. Resumo esquemático do processo de fabricação de filmes e tigelas à base de papel resistente a óleo por meio de revestimento por filtração e secagem em forno.
Adaptado de Tayeb et al. (2020)⁵

Shorey e Mekonnen (2022)¹⁰¹ avaliaram a viabilidade da lignina como aditivo de co-mistura em revestimentos à base de polibutileno adipato cotereftalato (PBAT), buscando alternativas biodegradáveis às ceras convencionais derivadas do petróleo. A adição de lignina aprimorou a relação custo-benefício e as propriedades mecânicas, aumentando a eficácia dos revestimentos na proteção de substratos de papel utilizados em embalagens sustentáveis de alimentos.

Abbadessa *et al.* (2023)¹⁰² aplicaram um método camada por camada para desenvolver revestimentos de lignina destinados à melhoria das propriedades de barreira de filmes de polietileno. O uso de polietilenoimina ou quitosana combinada com lignina resultou em revestimentos multicamadas de base biológica, que demonstraram superior estabilidade térmica e resistência ao oxigênio e ao vapor d'água, tornando-se uma alternativa promissora para embalagens funcionais.

A lignina tem sido aplicada com sucesso em revestimentos funcionais de substratos de papel, reforçando suas propriedades como material de embalagem sustentável. Apesar de ser reconhecida como aditivo alimentar por agências regulatórias, a falta de diretrizes específicas para nanomateriais à base de lignina, como suas nanopartículas, ainda representa um desafio para sua regulamentação e comercialização.²⁸

Extrusão de filme soprado

A extrusão de filmes soprados é um método amplamente utilizado na fabricação de polímeros para embalagens, permitindo a produção de filmes especializados, como os utilizados em embalagens de alimentos congelados, sacolas e barreiras protetoras. Os polímeros mais empregados nesse processo incluem polipropileno e polietileno de alta e baixa densidade (LDPE, HDPE e LLDPE), possibilitando a criação de estruturas monocamada ou multicamada por coextrusão.¹⁰³ Chiappero *et al.*, (2021)¹⁰⁴ desenvolveu filmes flexíveis de LLDPE contendo lignina (2,5%, 5% e 10%), cujas partículas variavam entre 38 e 75 μm .

Estudos sobre fluidez indicam que misturas poliméricas com até 85% de lignina Kraft podem ser moldadas por extrusão, com plastificantes ajustando a reticulação molecular para otimizar propriedades mecânicas. A combinação de polímero e plastificantes adequados resulta em uma temperatura de transição vítrea próxima à ambiente, permitindo ajustes na espessura e largura dos filmes produzidos. Fundição em solução e extrusão são técnicas populares para integrar lignina a polímeros comerciais e naturais, aplicáveis em embalagens, biomedicina e componentes automotivos.¹⁰⁵ A lignina incorporada em filmes de quitosana aumenta a

rugosidade da superfície, reduzindo o ângulo de contato, fenômeno também observado em compósitos de polipropileno com carga mista de sílica e lignina. Na moldagem por sopro de polietileno de alta densidade, a utilização de carga dupla contendo lignina tem sido reportada na literatura.¹⁰⁶ Métodos como extrusão por fusão (E-PLA) e fundição em solução foram aplicados na produção de nanocompósitos de PLA contendo até 3% em peso de nanopartículas de lignina (LNPs).¹⁰⁷

Uma vantagem da extrusão de filmes soprados é a capacidade de controlar as propriedades mecânicas do material final por meio de ajustes nos parâmetros de processamento e nos polímeros utilizados.¹⁰⁸ A técnica promove estiramento vertical e expansão radial do polímero, conferindo resistência ao filme. A modulação da inflação e tração permite a obtenção da resistência desejada nas direções transversal e de tração, além de possibilitar a fabricação de filmes monocamada ou multicamadas com variadas espessuras e larguras.¹⁰⁹

Moldagem por compressão

A moldagem por compressão é um método eficiente para o processamento de polímeros termofixos, caracterizado por seu baixo custo e viabilidade para produção em larga escala.¹¹⁰ O procedimento típico envolve um período de cura de 3 minutos a 180 °C e 700 kPa, permitindo a extração da embalagem plástica ao final do ciclo. Em um estudo, copolímeros à base de lignina foram uniformemente distribuídos em folhas de alumínio e submetidos à moldagem por compressão a 110 °C e aproximadamente 117 MPa, evidenciando melhorias na resistência ao impacto e à flexão conforme o aumento do teor de fibra.¹¹¹

Comparado à moldagem por compressão, o método de fundição em solução demonstrou maior eficiência na dispersão da lignina em filmes de PLA. Filmes de polietileno contendo lignina derivada de farinha de madeira de faia apresentaram propriedades antibacterianas aprimoradas quando processados por fundição em solução seguida de moldagem por compressão. A adição de 2% em peso de compostos antibacterianos a filmes de polietileno

por fundição em solução de xileno fervente e posterior moldagem por compressão reforçou suas características funcionais.¹¹²

Além disso, misturas de amido, PVA e lignina foram formuladas utilizando moldagem por compressão e mistura por fusão, com glicerol como plastificante.¹¹³ Dois tipos distintos de moldagem por compressão são empregados na fabricação de polímeros: a moldagem a frio, realizada à temperatura ambiente, e a moldagem a quente, na qual o calor do molde é transferido aos materiais compósitos para promover a cura.¹¹⁰

DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A lignina tem se consolidado como um recurso promissor para embalagens alimentícias, sendo valorizada por suas propriedades antioxidantes, antimicrobianas e estruturais. No entanto, sua aplicação enfrenta desafios relacionados à compatibilidade com polímeros, processamento, uniformidade e regulamentação.¹¹⁴

A estrutura heterogênea da lignina dificulta sua dispersão homogênea em matrizes poliméricas, exigindo modificações químicas para melhorar suas propriedades mecânicas e de barreira. Sua coloração acastanhada pode limitar aplicações que demandam transparência, tornando necessário o desenvolvimento de métodos de branqueamento eficientes. Além disso, estudos sobre sua ação contra fungos e leveduras ainda são escassos, restringindo sua validação para proteção alimentar.³²

Apesar de seu potencial, a comercialização de materiais à base de lignina enfrenta obstáculos regulatórios, especialmente no uso de nanopartículas (LNPs). Nos Estados Unidos, a lignina é reconhecida como um composto seguro para uso no desenvolvimento em embalagens alimentícias, enquanto na União Europeia, materiais derivados desse biopolímero exigem revisão pré-mercado conforme o Regulamento Quadro (CE) nº 1935/2004. A ausência de diretrizes específicas para nanomateriais representa um entrave à sua aplicação em larga escala.¹¹⁵

A tendência crescente de publicações científicas e patentes relacionadas ao processamento da lignina, conforme ilustrado na Figura 11, evidencia o avanço das pesquisas na exploração de suas vantagens e desafios. Esse aumento reflete o interesse crescente na valorização da lignina como um material funcional, bem como os esforços para superar limitações associadas à sua estrutura complexa, compatibilidade com polímeros e aplicação comercial.¹¹⁶

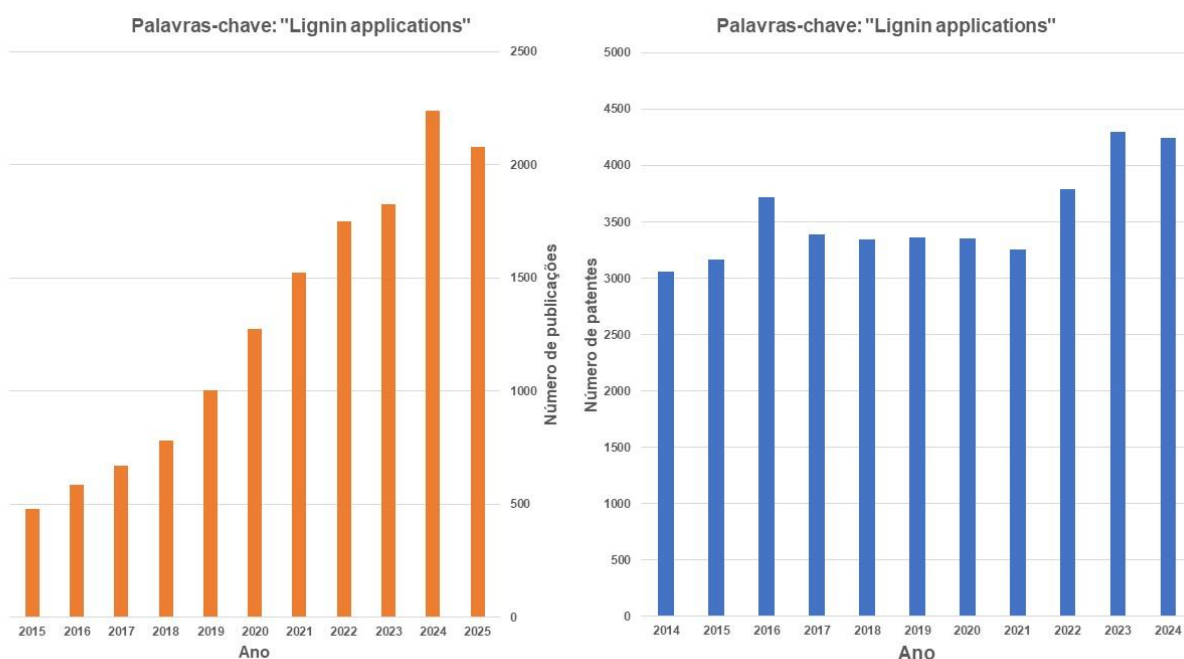


Figura 61. Publicações de pesquisas e patentes dedicadas a aplicações de lignina (Web of Science¹¹⁷ e Espacenet¹¹⁸). Fonte: Autor.

Em termos industriais, a transição para produção em massa depende da otimização de custos de extração e processamento, bem como da padronização da qualidade da lignina. Estratégias inovadoras, como a funcionalização da lignina e o desenvolvimento de blendas poliméricas, podem melhorar sua dispersão em materiais biodegradáveis, ampliando suas propriedades antimicrobianas e de barreira.¹¹⁹

A lignina tem sido amplamente investigada como matéria-prima para a produção de combustíveis, produtos químicos e materiais, impulsionada pelo aumento do volume de

lignina como subproduto sem aplicação adequada.¹²⁰ Sua versatilidade e tolerável citotoxicidade possibilitam diversas aplicações industriais. Mandlekar *et al.* (2018)¹¹⁶ destacaram a produção de fibra de carbono à base de lignina (LCF) como um caso de sucesso na valorização desse biopolímero, demonstrando sua viabilidade desde o laboratório até a planta piloto. Além disso, a lignina técnica tem sido explorada em compósitos poliméricos, configurando-se como um potencial mercado emergente.

Enquanto a lignina ainda busca consolidação na indústria de embalagens, extratos vegetais, como óleos essenciais, já são amplamente empregados nesse setor. Sanches-Silva *et al.* (2014)¹¹⁹ revisaram a aplicação de antioxidantes naturais, incluindo tocoferóis, carvacrol e extratos de alecrim, orégano, chá verde e semente de uva, que são incorporados à embalagem para conferir funcionalidades ativas sem contato direto com os alimentos.

A integração da lignina em embalagens inteligentes, combinadas a sensores para monitoramento da qualidade dos alimentos, representa uma perspectiva inovadora. Além disso, esforços para tornar seus processos produtivos mais sustentáveis, fortalecendo a pesquisa interdisciplinar e a colaboração entre indústria e órgãos reguladores, são fundamentais para consolidar a lignina como uma alternativa ecológica e viável na indústria de embalagens alimentícias.

CONCLUSÃO

O avanço no uso da lignina para embalagens alimentícias depende da superação de desafios técnicos e regulatórios que ainda limitam sua ampla adoção comercial. Embora apresente propriedades funcionais valiosas, como antioxidante, antibacteriana, antifúngica e de proteção UV, sua estrutura heterogênea dificulta a compatibilidade com polímeros de base biológica, exigindo modificações químicas para padronizar seu desempenho.

Além disso, sua coloração acastanhada pode reduzir sua aceitação no mercado, mesmo oferecendo vantagens na proteção contra radiação UV. Pesquisas futuras devem focar na validação desses materiais diretamente em alimentos, como frutas e vegetais, além de explorar

seu potencial antifúngico, considerando que fungos são uma das principais causas de deterioração alimentar.

No contexto da economia circular, a lignina representa uma alternativa viável para embalagens ativas derivadas de resíduos agroindustriais, contribuindo para soluções mais sustentáveis. No entanto, sua comercialização depende da padronização estrutural, garantindo uniformidade nas propriedades para atender às exigências industriais.

A adoção da lignina como um substituto para plásticos não degradáveis pode revolucionar a conservação de alimentos e consolidar um modelo de produção mais alinhado ao desenvolvimento sustentável. A colaboração entre academia, indústria e órgãos regulatórios será fundamental para viabilizar essa transição de forma eficiente e ambientalmente responsável.

REFERÊNCIAS

1. Li, L. et al.; *Nat. Sustain.* **2020**, *3*, 929–937.
2. Hatfield, R.; Vermerris, W.; *Plant Physiol.* **2001**, *126*, 1351–1357.
3. Ragauskas, A. J. et al.; *Science* **2014**, *344*, 1246843.
4. Ribeiro, A. M.; Santos, A. I.; Veiga, F.; Figueiras, A. 3 - Lignin Nanoparticle–Based Nanocomposite Hydrogels for Biomedical Applications. In *Functional Nanocomposite Hydrogels*; Kumar, A., Thakur, V. K., Eds.; Nanotechnology in Biomedicine; Elsevier, 2023; pp 69–90. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99638-9.00003-4>
5. Tayeb, A. H.; Tajvidi, M.; Bousfield, D.; *Molecules* **2020**, *25*, 1344
6. Wang, H.-M.; et al.; *Green Chem.* **2021**, *23*, 3790–3817
7. Fengel, D.; Wegener, G.; *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*; Walter de Gruyter GmbH and Co.: Berlin, 2011
8. Hubbard, W.; et al.; eds. *Sustainable Forestry for Bioenergy and Bio-based Products*. Southern Forest Research Partnership, Incorporated, **2007**
9. Brosse, N.; et al.; *Biofuel Bioprod. Biorefin.* **2012**, *6*, 580–598
10. David, K.; Ragauskas, A. J.; *Energ Environ Sci* **2010**, *3*, 1182–1190

11. Saha, B. C.; et al.; *Ind. Crops Prod.* **2013**, *44*, 367–372
12. Santos, F.A.; et al.; *Quím. Nova* **2012**, *35*, 1004-1010
13. Nunes, C. A.; et al.; *Quím. Nova* **2011**, *34*, 279–283
14. Huang, F.; Ragauskas, A.; *Ind. Eng. Chem. Res.* **2013**, *52*, 1743–1749
15. Gratzl, J. S.; Chen, C.L.; *ACS Symp Series* **2000**, *742*, 392
16. Laurichesse, S.; Avérous, L.; *Prog. Polym. Sci.* **2014**, *39*, 1266–1290
17. Kärkäs, M. D.; et al.; *Org. Biomol. Chem.* **2016**, *14*, 1853-1914, 2016
18. Sun, S.; et al.; *Ind. Crops Prod.* **2024**, *205*, 117621
19. Zhang, B.; et al.; *Innov. Mater.* **2024**, *2*, 100062
20. Argyropoulos, D. D. S.; et al.; *ChemSusChem* **2023**, *16*, e20230049
21. Koljonen, K., et al. *Cellulose* **2004**, *11*, 209–224
22. Öhman, F.; Theliander, H.; Tomani, P.E Axegard, P.; Method for separating lignin from black liquor, US 2008/0047674, **2008**.
23. Berlin, A.; Balakshin, M.; *Bioenergy research: advances and applications*, **2014**, p. 315-336
24. Abacherli, A.; Doppenberg, F.; *Treatment process of alkali solutions containing aromatic polymers*, CZ9903156, **2000**
25. Lora, J.H.; Glasser, W.G. J.; *Polym. Environ.* **2002**, *10*, 39–48
26. Priyadarshi, R.; Roy, S.; Ghosh, T.; Biswas, D.; Rhim, J.-W.; *Sustain. Mater. Technol.* **2021**, *32*, id. e00353
27. Basumatary, I.B.; Mukherjee, A.; Katiyar, V.; Kumar, S.C.; *Rev. Food Sci. Nutr.*, **2020**, *62*, 1912–1935.
28. Priyadarshi, R.; et al.; *J. Cleaner Prod.* **2024**, *469*, 143151
29. Argyropoulos, D. D. S.; et al.; *ChemSusChem* **2023**, *16*, e202300492
30. Alexy, P.; Košíková, B. ; Podstránska, G.; *Polymer* **2000**, *41*, 4901–4908.
31. Doherty, W.O.S.; Mousavioun, P.; Fellows, C.M.; *Ind. Crops Prod.* **2011**, *33*, 259–276

32. Santos, C. C.; et al.; *J. Environ. Chem. Eng.* **2023**, *11*, 109691
33. Sudheer, R.; Dutta, P. K.; Mehrotra, G. K.; *J. Pol. Mater.* **2017**, *34*, 171
34. Yang, W.; et al.; *Int. J. Biol. Macromol.* **2020**, *144*, 102-110
35. Ji, M.; et al.; *Carbohydr. Pol.* **2022**, *281*, 119078
36. Bhat, R.; et al.; *J Food Eng.* **2013**, *119*, 707-713
37. Rukmanikrishnan, B.; et al.; *Int. J. Biol. Macromol.* **2020**, *153*, 55-62
38. Yang, W.; et al.; *Eur. Polym. J.* **2016**, *79*, 1-12
39. Halloub, A.; et al.; *Carbohydr. Pol.* **2022**, *296*, 119972
40. Xiao, L.; et al.; *Ind. Crops Prod.* **2022**, *187*, 115515
41. Xie, H.; et al.; *Biomacromolecules* **2021**, *22*, 3251-3263
42. Quilez-Molina, A.; et al.; *ACS Sust. Chem. Eng.* **2022**, *10*, 15402-15413
43. Sun, X.; et al.; *Polymers*, **2023**, v. 15.8, p. 1959.
44. Li, K.; et al.; *Int. J. Biol. Macromol.* **2023**, *252*, 126281
45. Chen, K.; et al.; *Green Chem.* **2020**, *22*, 6357-6371
46. Spasojevic, D.; et al.; *Int. J. Antimicrob. Ag.* **2016**, *48*, 732-735
47. Maurya, A.; et al.; *Front. Sustain. Food Syst.* **2021**, *5*, 653420
48. Ndaba, B.; et al.; *Sustain. Chem. Pharm.* **2020**, *18*, 100342
49. Hararak, B.; et al.; *Food Packaging and Shelf Life*, **2022**, *34*, 100969
50. Roy, S.; et al.; in *Lignin-based Materials Health Care and Medical Applications*, ed. K. Joseph, R. Wilson, G. George, and S. Appukuttan, The Royal Society of Chemistry, 2023, ch. 6, pp. 106-129
51. Pu, Y.; et al.; *Food Control* **2021**, *123*, 107771
52. Yang, W.; et al.; *Int. J. Biol. Macromol.* **2016**, *89*, 360-368
53. Gregorova, A.; et al.; *Proceedings of the 3rd International Conference on Thomson Reuters of NANOCON.* **2011**, *9*, 21-23
54. Shankar, S.; Rhim, J.W.; *Food Hydrocoll* **2017**, *71*, 76-84
55. El-Nemr, K.F.; et al.; *Int J Environ Anal Chem* **2020**, *100*, 1578-1602

56. He, X.; et al.; *J. Cleaner Production*, **2023**, *408*, 137255
57. Wang, X. et al. *Renew Sustain Energy Rev.* **2022**, *153*, 111756
58. Ponomarenko, J.; et al.; *Holzforschung* **2015**, *69*, 795-805
59. Miao, M.; et al.; *Food Hydrocoll.* **2024**, *146*, 109257
60. Yang W.; et al.; *Int J Biol Macromol* **2016**, *89*, 360–368
61. Zhang, P.; et al.; *Materials* **2018**, *11*, 1686
62. Sadeghifar, H.; Ragauskas, A.; *Polymers* **2020**, *12*, 1134
63. Verduin, J.; et al.; *J. Food Sci. Nutr.* **2020**, *6*, 24966
64. Mortensen, G.; et al.; *Int. Dairy J.* **2004**, *14*, 85-102
65. Anushikha, G.K.K.; *Biomass Conv. Bioref.* **2024**, *14*, 16755–16767
66. De Santis, F.; Pantani, R.; *Sci. World J.* **2013**, *2013*, 354093
67. Izaguirre, N.; et al.; *Int J Biol Macromol* **2020**, *155*, 447-455
68. Wang, J.; et al.; *Green Chem.* **2016**, *18*, 695-699
69. Zhang, H.; et al.; *Green Chem.* **2017**, *19*, 5152-5162
70. Asim, M.; et al.; *J. Renew. Mat.* **2018**, *6*, 383-393
71. Yang, C.; et al.; *Food Chem.* **2019**, *280*, 51–58
72. Izaguirre, N.; et al.; *Int J Biol Macromol* **2020**, *155*, 447-455
73. Aadil, K. R.; et al.; *Food Packaging and Shelf Life* **2016**, *10*, 25-33
74. Mostafa, H.; et al.; *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *279*, 134843
75. Yang, W.; et al.; *Compos. Commun.* **2020**, *22*, 100497
76. Sangroniz, A.; et al.; *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 1–7
77. Mujtaba, M.; et al.; *Sci. Total Env.* **2022**, *851*, 158328
78. Kovalcik, A.; et al.; *React. Funct. Polym.* **2015**, *94*, 25-34
79. Shankar, S.; *Int. J. Biol. Macromol.* **2015**, *81*, 267-273
80. Núñez-Flores, R.; et al.; *Food Hydrocoll.* **2012**, *27*, 60-71
81. Crouvisier-Urión, K.; et al.; *ACS Sust. Chem. Eng.* **2016**, *4*, 6371-6381
82. Müller, K.; et al.; *Nanomaterials* **2017**, *7*, 74.

83. Abdan, K. B.; et al.; *Handbook of chitin and chitosan. Elsevier*, **2020**, p. 175-227
84. Luong, N. D.; et al.; *BioResources* **2013**, *8*, 4518-4532
85. Sen, S., Patil, S.;Argyropoulos, D.S.; *Green Chem.* **2015**, *17*, 4862-4887
86. Chung, Y.-L.; et al.; *ACS Sust. Chem. Eng.* **2013**, *1*, 1231-1238
87. Mousavioun, P.; Halley, P. J.;; Doherty, W. O.; *Ind. Crops Prod.* **2013**, *50*, 270-275
88. Zabel, R.A.; Morrell, J.J.; *Wood microbiology*, **2020**, 2 ed., p. 215–244
89. Tuomela, M.; et al.; *Bioresource Technol.* **2000**, *72*, 169-183
90. Nguyen, H. T.; et al.; *Scientia Horticulturae* **2021**, *281*, 109916
91. Korbag, I.; Mohamed S.; *S. Int. J. Environ. Stu.* **2016**, *73*, 18-24
92. Agustiany, E.A.; et al.; *Polym Compos* **2022**, *43*, 4848–4865
93. Wang, T.; et al.; *Sci Rep* **2018**, *8*, 1–8
94. Quilez-Molina, A. I.; et al.; *ACS Sust. Chem. Eng.* **2022**, *10*, 15402-15413.
95. Zhang, C.W.; et al.; *Carbohydr. Polym.* **2020**, *230*, 115626
96. Bužarovska, A.; et al.; *J. Mater. Sci.* **2021**, *56*, 13785–13800
97. Chaubey, A.; Keshaw, R. A.; Harit, J.; *Mater. Technol.* **2021**, *36*, 585-593
98. Khadem, E. et al.; *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *261*, 129877
99. Xie, H.; et al.; *Biomacromolecules* **2021**, *22*, 3251-3263
100. Shorey, R. & Mekonnen, T.H.; *Int. J. Biol. Macromol.*, **2022**, *209*, 472-484
101. Abbadessa, A.; et al.; *Prog.Org. Coat.* **2023**, *182*, 107676
102. Wang, Y.; Padua, G.W.; *Macromol Mater Eng* **2003**, *288*, 886–893
103. Chiappero, L.R.; et al.; *J Polym Environ* **2021**, *29*, 450–459
104. Li. Y.; *ACS Sustain Chem Eng*, **2019**, *7*, 6234–6242
105. Bula, K.; Klapiszewski,Ł.; Jesionowski, T.; *Polym Test.* **2019**, *77*, 105911
106. Yang, W.; et al.; *Eur Polym J* **2015**, *71*, 126–139
107. Winters, E.P.; Deardorff, D.L.; *J Am Pharm Assoc (Scientific Ed)*, **1958**, *47*,
608–612
108. Edebali, S.; *Iran. J. Chem. Chem. Eng.* **2020**, *39*, 245–25

109. Dixit, D.; Pal, R.; Kapoor, G. & Stabenau, M.; *Second edn. Elsevier Inc.*, **2016**, p. 157–216
110. Kang, Y.; Chen, Z.; Wang, B. & Yang, Y.; *Ind Crop Prod* **2014**, *56*, 105–112
111. Gregorova, A.; Hrabalova, M.; Kovalcik, R.; Wimmer, R.; *Polym Eng Sci* **2011**, *51*, 143–150
112. Wulandari, R.R.; *J Phys Conf Ser* **2019**, *1295*, 012058
113. Bajwa, D.S.; et al.; *Ind Crop Prod* **2019**, *139*, 111526
114. Rosu, L.; Cascaval, C. N.; Rosu, D.; *Polym. Test.* **2009**, *28*, 296-300
115. Bajwa, D. S.; Pourhashem, G.; Ullah, A. H.; Bajwa, S. G.; *Ind Crop Prod* **2019**, *139*, 111526
116. Mandlekar, N.; et al.; *Lignin-trends and applications*, **2018**, *9*, 207-231
117. Web of Science. <https://www.webofscience.com/wos>. Acessado em 16 de outubro de 2025
118. Espacenet. <https://worldwide.espacenet.com/patent>. Acessado em 16 de outubro de 2025
119. Sanches-Silva, A.; et al.; *Food Addit Contamin: Part A* **2014**, *31*, 374-395
120. Guo, Y.; et al.; *Polymers* **2019**, *11*, 1455