EVENTO ON-LINE
III CIGELUBRA
Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Estratégias de processamento para produção de madeira transparente: uma análise comparativa orientada à sustentabilidade

Tainara Rigotti de Castro
Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Estadual de Maringá/UEM

Resumo: A busca por alternativas de base renovável tem impulsionado o desenvolvimento da madeira transparente, um compósito que combina a arquitetura celular da madeira a propriedades ópticas ajustadas. Contudo, a utilização de uma matéria-prima renovável não assegura, por si só, que o material final ou seu processo de fabricação sejam sustentáveis. Os estudos experimentais empregam atributos heterogêneos para classificar suas rotas como ecológicas, muitas vezes omitindo os impactos do processamento químico e da incorporação de polímeros sintéticos. Neste contexto, este artigo objetivou analisar como a literatura caracteriza a sustentabilidade das rotas de processamento da madeira transparente, identificando os aspectos mobilizados e as dimensões consideradas nessa construção. Para isso, realizou-se uma análise comparativa de sete estudos experimentais por meio de uma matriz analítica abrangendo dimensões de matéria-prima, modificação, recursos, processamento, infiltração, desempenho e escalabilidade. Os resultados revelam um padrão recorrente de justificativas relacionadas à redução da intensidade do processamento e às propriedades funcionais do material. Em contrapartida, observa-se uma lacuna na dimensão do material de infiltração, visto que alguns trabalhos recorrem a polímeros de origem petroquímica sem integrar seu impacto ambiental na argumentação. Evidencia-se que as alegações de sustentabilidade na literatura são predominantemente parciais e baseadas na simples presença da madeira, ressaltando a necessidade de Avaliações do Ciclo de Vida (ACV) abrangentes que contemplem todo o processo produtivo.

Palavras-chave: Madeira transparente, Sustentabilidade, Rotas de processamento, Biocompósitos, Avaliação do ciclo de vida.

Processing Strategies for Transparent Wood Production: A Sustainability-Oriented Comparative Analysis

Abstract: The search for renewable-based alternatives has driven the development of transparent wood, a composite material that combines the cellular architecture of wood with tailored optical properties. However, the use of a renewable feedstock does not, in itself, ensure that the final material or its manufacturing process is sustainable. Experimental studies employ heterogeneous attributes to classify their processing routes as environmentally friendly, often overlooking the impacts of chemical processing and the incorporation of synthetic polymers. In this context, this study aimed to analyze how the literature characterizes the sustainability of transparent wood processing routes, identifying the aspects considered and the dimensions involved in this characterization. To this end, a comparative analysis of seven experimental studies was conducted using an analytical matrix encompassing raw material, modification, resources, processing, infiltration, performance, and scalability dimensions. The results reveal a consistent pattern of justifications focused on optimizing delignification and achieving energy savings during the use

phase. In contrast, a significant gap was identified regarding the infiltration material, as some studies employ petroleum-derived polymers without incorporating their environmental impacts into the sustainability rationale. These findings indicate that sustainability claims in the literature are predominantly partial and largely based on the mere use of wood, highlighting the need for comprehensive Life Cycle Assessments (LCAs) that encompass the entire production process.

Keywords: Transparent wood; Sustainability; Processing routes; Biocomposites; Life Cycle Assessment.

1. Introdução

A busca por alternativas aos materiais convencionais tem impulsionado o desenvolvimento de materiais de base renovável como parte das estratégias voltadas à redução da dependência de recursos fósseis e dos impactos ambientais associados à produção de materiais. Fibras naturais, biopolímeros e biocompósitos têm recebido atenção crescente devido à possibilidade de utilizar recursos renováveis e desenvolver materiais destinados a diferentes aplicações de engenharia (VINOD *et al.,* 2020). Entretanto, a utilização de uma matéria-prima renovável não implica, por si só, que o material ou o processo de fabricação seja sustentável.

A origem dos insumos, as transformações químicas e físicas, o consumo de energia e recursos, os materiais incorporados e as possibilidades de reutilização, reciclagem ou descarte ao final da vida útil também influenciam o desempenho ambiental de uma solução tecnológica (GOLDHAHN *et al.,* 2021). Assim, a sustentabilidade de novos materiais deve ser considerada não apenas a partir de suas matérias-primas, mas também das características das rotas de processamento utilizadas em sua obtenção.

Nesse contexto, a madeira apresenta particular interesse por ser um recurso renovável e por possuir uma estrutura hierárquica naturalmente organizada, constituída principalmente por celulose, hemiceluloses e lignina. Essa arquitetura confere ao material propriedades mecânicas e funcionais relevantes e, simultaneamente, oferece uma estrutura natural que pode ser modificada para a obtenção de materiais com propriedades distintas da madeira convencional (CHEN *et al.,* 2020).

O desenvolvimento de materiais avançados a partir da madeira tem, portanto, explorado não apenas sua composição química, mas também a preservação e a engenharia de sua estrutura celular. Essa abordagem possibilitou o desenvolvimento da madeira transparente, um material compósito que combina a arquitetura natural da madeira com propriedades ópticas, mecânicas e funcionais ajustadas por meio de modificações químicas e da incorporação de outros materiais (LI *et al.,* 2018).

O desenvolvimento da madeira transparente envolve diferentes etapas de processamento, como deslignificação, lavagem, troca de solventes, secagem, infiltração e cura, que variam conforme a estratégia adotada (GULLO *et al.,* 2026). Essas diferenças podem alterar o consumo de reagentes, energia e solventes e, consequentemente, os impactos ambientais da produção. Estudos de avaliação do ciclo de vida confirmam que a escolha dos agentes de deslignificação e dos materiais de infiltração influencia o desempenho ambiental das diferentes rotas (WU *et al.,* 2024).

Ao mesmo tempo, diferentes estudos experimentais utilizam atributos diversos para caracterizar suas propostas como sustentáveis, verdes ou ambientalmente amigáveis. Entretanto, esses atributos não são necessariamente avaliados de maneira uniforme entre os estudos. A própria literatura reconhece que a sustentabilidade de materiais de madeira pode ser comprometida por técnicas de processamento e modificação que utilizam precursores fósseis ou resultam em compósitos de difícil reutilização e reciclagem (GOLDHAHN *et al.,* 2021).

Apesar do avanço da literatura sobre preparação, propriedades e aplicações da madeira transparente, permanece uma diversidade significativa na forma como os estudos descrevem e justificam seus aspectos de sustentabilidade. Revisões recentes passaram a incorporar questões relacionadas à sustentabilidade, escalabilidade, padronização e considerações de ciclo de vida, evidenciando que esses aspectos ainda constituem desafios para a consolidação do material (GULLO *et al.,* 2026). Entretanto, as informações utilizadas para caracterizar as diferentes rotas como sustentáveis encontram-se dispersas entre os trabalhos e abrangem diferentes dimensões do material e do processo. Assim, uma análise pode contribuir para compreender quais aspectos têm sido mobilizados na literatura para caracterizar a sustentabilidade das rotas de processamento da madeira transparente e como esses aspectos variam entre os estudos.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo analisar como os autores caracterizam a sustentabilidade das rotas de processamento da madeira transparente, identificando os principais aspectos mobilizados para fundamentar essas alegações e as dimensões consideradas ou não consideradas nessa caracterização.

O artigo está organizado em cinco seções. Após esta introdução, a Seção 2 apresenta os procedimentos metodológicos empregados na pesquisa. A Seção 3 apresenta o referencial teórico, seguido da Seção 4 que discute os resultados. A Seção 5 apresenta as conclusões do estudo e, por fim, reúne-se as referências utilizadas.

2. Metodologia

Este estudo foi desenvolvido por meio de uma análise comparativa da literatura sobre estratégias de processamento empregadas na produção de madeira transparente, com foco na forma como os estudos caracterizam a sustentabilidade de suas respectivas rotas tecnológicas.

A identificação dos estudos foi realizada por meio de busca bibliográfica em publicações científicas relacionadas à produção de madeira transparente, priorizando trabalhos experimentais que descrevessem de forma suficientemente detalhada as rotas de processamento, os materiais empregados e os atributos utilizados para caracterizar as propostas como sustentáveis, verdes ou ambientalmente amigáveis. Foram utilizadas as bases de dados Web of Science, Scopus, ScienceDirect. As palavras-chave utilizadas foram “transparent wood”, “sustainable”, “green processing” e “eco-friendly”; por meio da combinação com operadores boleanos “AND” e “OR”.

A seleção foi realizada a partir da leitura dos títulos, resumos e, posteriormente, dos textos completos, considerando como critérios de inclusão: (i) apresentar uma estratégia de produção ou processamento de madeira transparente; (ii) fornecer informações sobre os materiais e as principais etapas da rota tecnológica; e (iii) estabelecer explicitamente alguma associação entre a rota proposta e atributos de sustentabilidade, origem biológica, redução de recursos ou menor impacto ambiental. Foram excluídos estudos que não apresentassem informações suficientes sobre o processamento ou que não estabelecessem relação explícita entre a estratégia desenvolvida e aspectos de sustentabilidade. Ao final desse processo, foram selecionados sete estudos experimentais, que constituíram o corpus da análise comparativa.

Considerando a recorrência de determinadas estratégias de processamento na literatura, não foram incluídos todos os estudos identificados na busca. Quando diferentes trabalhos apresentavam rotas de processamento substancialmente semelhantes, foi selecionado um estudo representativo de cada abordagem, priorizando aqueles que apresentavam maior detalhamento metodológico e informações relevantes para as dimensões analisadas. Esse procedimento teve como objetivo evitar a redundância de informações e assegurar uma

comparação mais equilibrada entre as diferentes estratégias de processamento identificadas.

A partir dos estudos selecionados, elaborou-se uma matriz de análise utilizada para identificar quais aspectos das rotas de processamento são apresentados pelos próprios autores como justificativa para suas alegações de sustentabilidade. Dessa forma, a análise não buscou verificar ou validar a sustentabilidade das rotas, mas examinar a base argumentativa utilizada na literatura para realizar essas associações.

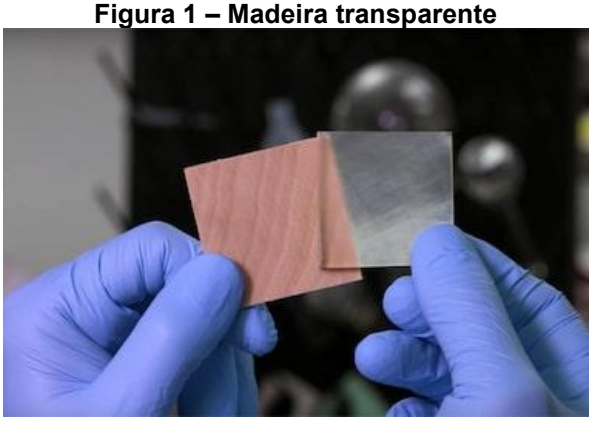
Para cada estudo, foram verificadas sete dimensões, considerando-se a existência de informações relacionadas à matéria-prima, às estratégias de modificação, ao consumo de recursos, às características do processamento, aos materiais de infiltração, ao desempenho e à escalabilidade. A presença de uma dimensão indica que o estudo apresenta informações sobre aquele aspecto; entretanto, não significa que o critério tenha sido quantitativamente avaliado ou que o atendimento à dimensão comprove a sustentabilidade da rota. Essa distinção é necessária porque os estudos selecionados partem de diferentes fundamentos para caracterizar suas propostas.

3. Referencial Teórico

3.1 Madeira transparente e rotas de processamento

A madeira é um material natural de estrutura hierárquica, constituído principalmente por celulose, hemiceluloses e lignina, cuja organização celular influencia diretamente suas propriedades mecânicas e funcionais. Essa arquitetura pode ser utilizada como estrutura de suporte para o desenvolvimento de materiais avançados, preservando características da madeira e incorporando novas funcionalidades (CHEN *et al.,* 2020). Nesse contexto, a madeira transparente (Figura 1) destaca-se como um compósito de base biológica que combina a estrutura natural da madeira com propriedades ópticas e mecânicas ajustadas por meio de modificações químicas e da incorporação de outros materiais (LI *et al.,* 2018).

Figura 1 – Madeira transparente



Fonte: MARIN (2021)

A obtenção da madeira transparente baseia-se, em geral, na redução da absorção e do espalhamento da luz pela estrutura lignocelulósica. Para isso, a lignina pode ser removida parcialmente ou modificada, enquanto a estrutura porosa da madeira é preservada. Posteriormente, os espaços celulares podem ser preenchidos com um material cujo índice de refração seja compatível com o da matriz lignocelulósica, reduzindo a diferença de índices de refração e favorecendo a transmissão da luz (LI *et al.,* 2018; MARIN, 2021).

As estratégias de produção, entretanto, apresentam diferenças significativas quanto aos materiais empregados e às condições de processamento. As rotas podem envolver etapas de deslignificação ou modificação da lignina, lavagem, troca de solventes, secagem, infiltração e cura ou polimerização. Também são estudadas estratégias que preservam parte da lignina ou modificam seletivamente seus grupos cromóforos, buscando reduzir etapas de processamento e alterar as características do material final (GULLO *et al.,* 2026).

Dessa forma, a madeira transparente corresponde a um conjunto de estratégias de processamento com diferentes combinações de matérias-primas, reagentes, infiltrantes e condições operacionais (CARVALHO *et al.,* 2018).

3.2 Sustentabilidade no desenvolvimento e processamento de materiais

A utilização de recursos renováveis constitui uma importante estratégia para o desenvolvimento de materiais de base biológica, especialmente diante da necessidade de reduzir a dependência de recursos fósseis. Entretanto, a origem renovável da matéria-prima não é suficiente para caracterizar um material como sustentável, uma vez que seus impactos também dependem dos processos de transformação, dos insumos empregados e das possibilidades de uso e disposição ao final da vida útil (VINOD *et al.,* 2020; GOLDHAHN *et al.,* 2021).

No desenvolvimento de materiais de madeira, essa questão é particularmente relevante. Processos de modificação podem envolver reagentes químicos, solventes, consumo de água e energia, enquanto a incorporação de polímeros de origem fóssil pode dificultar a reutilização, reciclagem ou biodegradação do material ao final de sua vida útil (GOLDHAHN *et al.,* 2021). Assim, atributos como origem renovável, conteúdo biobaseado, redução do uso de reagentes, menor consumo energético, redução do tempo de processamento e biodegradabilidade devem ser analisados considerando-se o conjunto da rota tecnológica, e não apenas etapas ou componentes isolados.

Para a madeira transparente, essa perspectiva é especialmente importante porque diferentes combinações de tratamentos de madeira e materiais de infiltração podem resultar em desempenhos ambientais distintos. Estudos de avaliação do ciclo de vida demonstram que a escolha dos agentes de modificação e infiltração e a escala de produção podem influenciar significativamente os impactos ambientais associados à fabricação da madeira transparente (RAI *et al.,* 2022). Portanto, a caracterização da sustentabilidade dessas rotas requer a consideração conjunta das características da matéria-prima, dos materiais empregados e das condições de processamento.

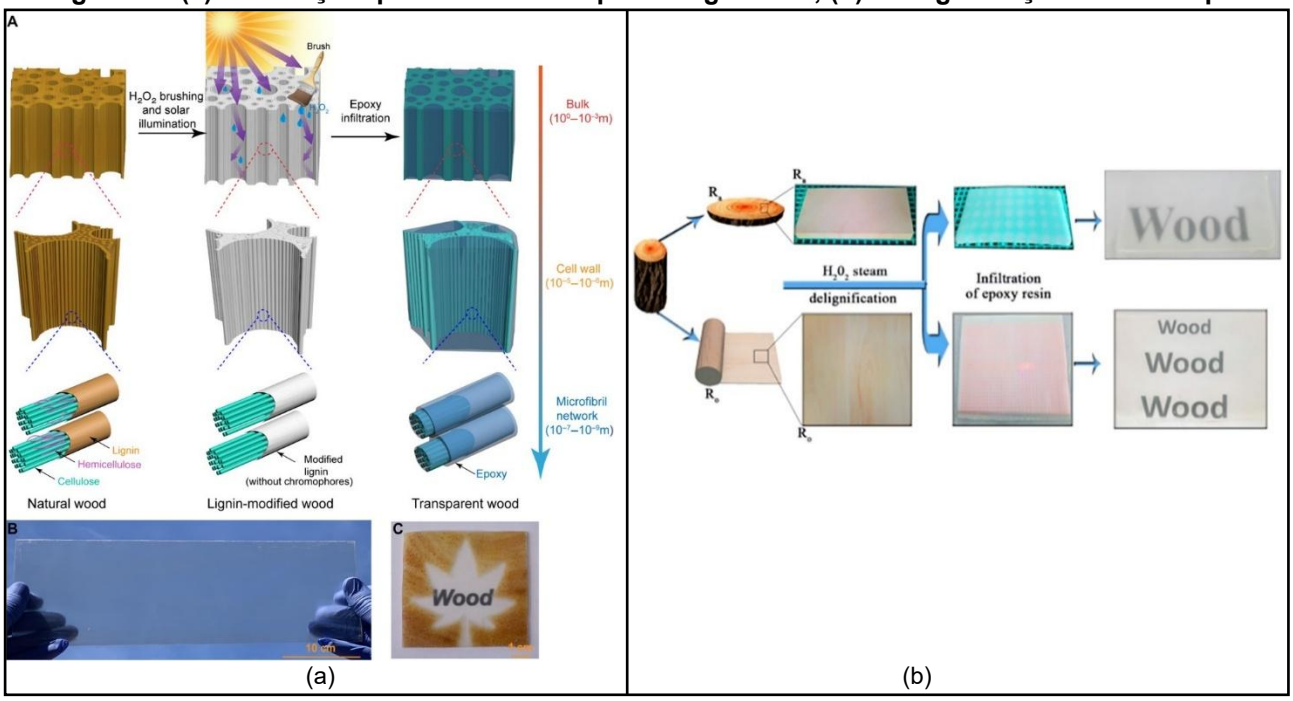
4. Resultados

4.1 Comparação das estratégias de processamento

A análise dos estudos selecionados evidenciou diferentes estratégias de processamento empregadas na produção de madeira transparente, com variações tanto na forma de modificação da estrutura lignocelulósica quanto nos materiais utilizados para preenchimento da matriz. Embora os trabalhos compartilhem o objetivo de obter propriedades ópticas adequadas, as rotas adotadas apresentam diferentes abordagens para reduzir a intensidade do processamento, preservar componentes da madeira ou substituir materiais convencionalmente empregados.

Entre as estratégias identificadas, observa-se a utilização de tratamentos destinados à redução ou modificação da lignina. Entretanto, essa etapa não é conduzida de maneira uniforme. Enquanto algumas propostas empregam tratamentos químicos convencionais para promover a deslignificação, outras procuram reduzir a intensidade desse tratamento ou modificar seletivamente os componentes responsáveis pela coloração da madeira. Xia *et al.* (2021), por exemplo, propuseram uma estratégia assistida por UV que utiliza aplicação superficial de peróxido de hidrogênio (Figura 2a), enquanto Li *et al.* (2019) empregaram tratamento com vapor associado ao peróxido de hidrogênio (Figura 2b). Essas abordagens diferem das rotas baseadas em tratamentos químicos prolongados e indicam uma busca por alternativas de processamento potencialmente menos intensivas.

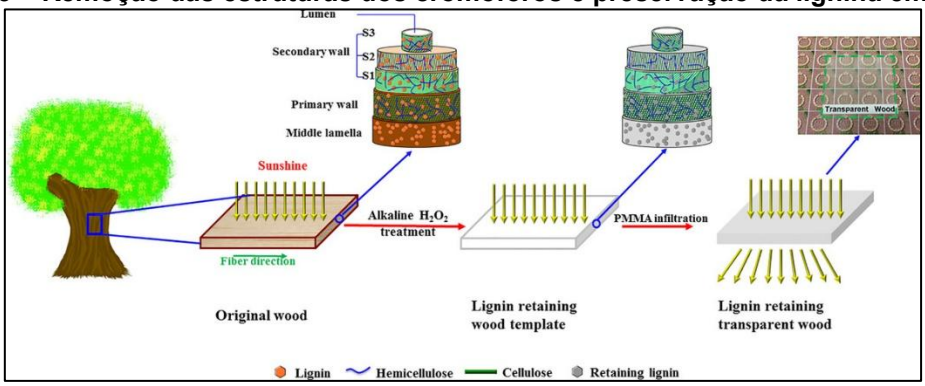
Figura 2 – (a) Escovação química assistida por energia solar; (b) Deslignificação verde à vapor



Fonte: Elaborado a partir de LI *et al.* (2019) e XIA *et al.* (2021)

Outra estratégia identificada está relacionada à preservação parcial da estrutura original da madeira. Li *et al.* (2017) propuseram a retenção de aproximadamente 80% da lignina (Figura 3). Essa abordagem diferencia-se da lógica de remoção extensiva da lignina e sugere que a manutenção de componentes estruturais da madeira pode ser utilizada como estratégia de desenvolvimento do material, reduzindo a necessidade de modificações da intensidade de processamento.

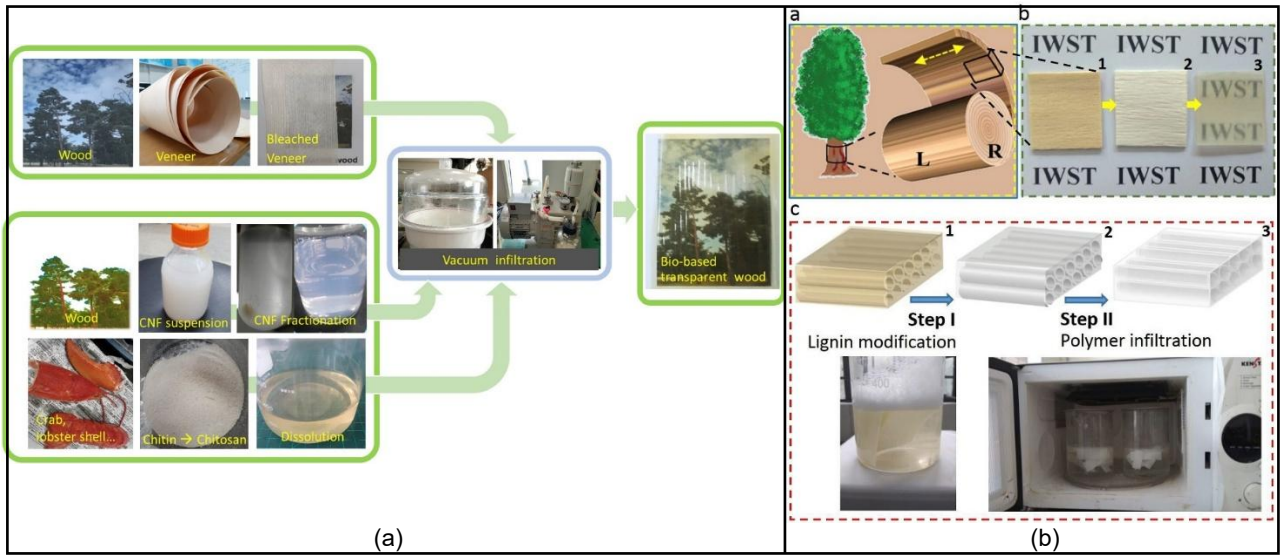
Figura 3 – Remoção das estruturas dos cromóforos e preservação da lignina em massa



Fonte: LI *et al.* (2017)

Também foram identificadas diferenças relevantes quanto aos materiais empregados na etapa de preenchimento. Alguns estudos exploram materiais de base biológica ou com características consideradas ambientalmente favoráveis. Montanari *et al.* (2021) utilizaram um monômero de acrilato de limoneno de base biológica, Hai *et al.* (2021) empregaram quitosana e nanofibras de celulose (Figura 4a) e Rao *et al.* (2019) utilizaram PVA (álcool polivinílico) em dispersão aquosa (Figura 4b). Dessa forma, a busca por sustentabilidade pode se estender à composição do material incorporado à estrutura.

Figura 4 – (a) Madeira transparente impregnada com nanofibra de celulose e quitosana; (b) Branqueamento e infiltração de madeira com uma dispersão aquosa de PVA



Fonte: Elaborado a partir de HAI *et al.* (2021) e RAO *et al.* (2019)

A Tabela 1 sintetiza as principais características das rotas analisadas, considerando a matéria-prima, a estratégia de modificação, o material de infiltração, as principais condições de processamento, o desempenho reportado e os aspectos de sustentabilidade explicitamente apontados pelos autores.

Tabela 1 – Matriz de métodos de produção de madeira transparente

Estudo	Matéria-prima	Estratégia de modificação da madeira	Infiltrante/ preenchimento	Condições/ processamento principais	Desempenho reportado	Aspectos de sustentabilidade apontados
Xia *et al.* (2021)	Madeira balsa, 200×10×0,6 (mm)	Escovação química assistida por energia solar/UV (ultravioleta); remoção parcial da lignina	Epóxi transparente	H_2O_2 30%; escovação com 15 mL; UV por 1 h; infiltração por vácuo	Transparência ~90%; manutenção da resistência; menor peso que vidro	Redução do consumo de produtos químicos, energia e tempo de processamento
Montanari *et al.* (2021)	Amieiro, bétula, faia (0,7 mm); balsa (1,2–3 mm)	Deslignificação com ácido peracético + succinilação	Monômero de acrilato de limoneno, biobaseado	Ácido peracético 4%, pH 4,8, 80 °C; succinilação a 130 °C/0,5 h; infiltração sob vácuo; polimerização a 75 °C/24 h	Transparência ~90%; recuperação da resistência	Produto e processo renováveis; produtos químicos derivados de matérias-primas de base biológica
Li *et al.* (2019)	Pinho, 50/100×50 (mm); espessuras de 5, 10 e 20 (mm)	Deslignificação verde a vapor com H_2O_2	Resina epóxi	Vapor sobre H_2O_2 30%; 2–12 h; infiltração sob vácuo; vácuo repetido 3×; cura a 30 °C/24 h	Alta transmitância e resistência mecânica	Processo simples, verde, livre de sulfeto e cloro, rápido e eficiente
Hai *et al.* (2021)	Madeira folheada de abeto	Branqueamento com clorito de sódio	Nanofibras de quitosana e celulose	$NaClO_2$ 1%, pH 4–5, 80 °C/6–8 h; troca de solventes; infiltração sob vácuo por 1 h; secagem a 40 °C/2 dias	Boa transparência e névoa; proteção UV; excelentes propriedades mecânicas e antioxidantes	Totalmente biobaseado/ ecologicamente correto; potencial para embalagens ecológicas
Mi *et al.* (2020)	Madeira de abeto Douglas	Remoção espacial seletiva da lignina, preservando os padrões naturais	Epóxi	$NaClO_2$ + ácido acético, pH ~4,6; ebulição por 2 h; lavagem; infiltração	Transparência 80%; bloqueio UV; névoa 93%	Ambientalmente correto, conforme levantamento

Estudo	Matéria-prima	Estratégia de modificação da madeira	Infiltrante/ preenchimento	Condições/ processamento principais	Desempenho reportado	Aspectos de sustentabilidade apontados
				completa com epóxi; solidificação 24 h		
Rao *et al.* (2019)	Madeira de choupo, 20×20×1 (mm)	Modificação da lignina/branqueamento	PVA em dispersão aquosa	NaOH 3%, Na_2EDTA 0,1%, 70 °C; $MgSO_4$ + H_2O_2; PVA 10% m/v; aquecimento em micro-ondas com ciclos; secagem 24 h	Transmitância até 80%; névoa 90%; excelente flexibilidade; anisotropia óptica e mecânica	Ambientalmente correto; PVA descrito como barato, não tóxico, solúvel em água e biodegradável
Li *et al.* (2017)	Folheados de pinho, bétula e freixo, 1,5 mm	Retenção de lignina: remoção dos cromóforos e preservação da lignina em massa	PMMA (polimetilmetacrilato)	$NaClO_2$ 1%, pH 4,6, 80 °C; desidratação com etanol/acetona; PMMA pré-polimerizado; infiltração sob vácuo; polimerização a 75 °C/4 h	~80% da lignina preservada; transmitância 83%; névoa 75%	Processo mais ecológico e economia de tempo

4.2 Dimensões das alegações de sustentabilidade

Os estudos selecionados apresentam diferentes argumentos para associar as madeiras transparentes desenvolvidas a atributos como sustentabilidade, caráter verde, origem biológica ou redução do consumo de recursos. Para sistematizar como esses discursos são construídos, a análise concentrou-se em mapear as características das matérias-primas, dos reagentes, dos processos e dos materiais de preenchimento mobilizados pelos autores para fundamentar suas alegações.

A definição de um conjunto abrangente de dimensões faz-se necessária porque a avaliação do impacto ambiental de um biocompósito não deve se restringir à origem renovável do seu suporte estrutural, mas sim abarcar todas as etapas de transformação, o uso de insumos auxiliares, as propriedades do polímero incorporado e a viabilidade de ganho de escala. Com base nessa perspectiva, a Tabela 2 apresenta o quadro analítico desenvolvido para este estudo.

Tabela 2 – Dimensões considerados para análise das alegações de sustentabilidade

Dimensão	Aspecto identificado nos estudos
Matéria-prima	Espécie/tipo de madeira, espessura e origem, quando relacionados pelos autores à caracterização da rota
Modificação da madeira	Reagentes, concentração, temperatura e tempo, quando utilizados pelos autores como argumento relacionado à sustentabilidade
Consumo de recursos	Água, energia, solventes e produtos químicos, especialmente quando os autores destacam redução ou menor utilização
Processamento	Número de etapas, tempo, complexidade e necessidade de vácuo/pressão, quando associados pelos autores a vantagens ambientais ou de eficiência
Material de infiltração	Tipo e origem do polímero/material utilizado e características destacadas pelos autores, como origem biológica, biodegradabilidade ou menor toxicidade
Desempenho	Transparência, resistência, flexibilidade e proteção UV, quando essas características são relacionadas pelos autores a aplicações ou vantagens que compõem sua argumentação
Escalabilidade	Dimensões das amostras, potencial de produção em maior escala e aspectos do processo explicitamente relacionados pelos autores à escalabilidade

4.3 Aplicação das dimensões das alegações de sustentabilidade

A matriz apresentada na Tabela 3 foi aplicada aos estudos selecionados com o objetivo de verificar quais dimensões da rota de processamento são efetivamente consideradas pelos

autores ao caracterizarem seus métodos como sustentáveis, verdes ou ambientalmente amigáveis.

Tabela 3 – Dimensões abordadas nos estudos para fundamentar alegações de sustentabilidade

Estudo	Matéria-prima	Modificação	Recursos	Processamento	Infiltração	Desempenho	Escalabilidade
Xia *et al.* (2021)	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
Montanari *et al.* (2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Li *et al.* (2019)	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
Hai *et al.* (2021)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mi *et al.* (2020)	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓
Rao *et al.* (2019)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Li *et al.* (2017)	✓	✓	✓	✓	—	✓	✓

Nota: ✓ indica que o estudo apresenta explicitamente informações relacionadas à dimensão; — indica que não foram identificadas informações relacionadas à dimensão no estudo. A marcação não representa avaliação de desempenho ou grau de sustentabilidade da rota.

A sistematização dos estudos revela um padrão homogêneo na mobilização de argumentos de sustentabilidade voltados à estrutura lignocelulósica e ao processo de fabricação, mas expõe uma clara divergência no que tange à matriz polimérica utilizada. A presença do marcador ✓ em praticamente todas as dimensões analisadas decorre da recorrência de informações relacionadas à modificação da estrutura lignocelulósica e às condições de processamento nas justificativas apresentadas pelos autores. Isso inclui o uso de espécies de madeira de crescimento rápido ou baixo valor comercial, a redução na concentração de reagentes, a diminuição do tempo e da temperatura de reação, a dispensa de vácuo/pressão severos e os ganhos de eficiência energética propiciados pelo material na fase de uso.

A única dimensão que apresenta descontinuidade (—) entre os trabalhos é o Material de Infiltração. Os estudos de Xia et al. (2021), Li et al. (2019), Mi et al. (2020) e Li et al. (2017) receberam a marcação — nessa dimensão porque recorrem a polímeros sintéticos convencionais de origem fóssil (como resina epóxi comercial e PMMA) e não mobilizam a origem, biodegradabilidade ou atoxidade da matriz de preenchimento como argumento integrativo da sustentabilidade do seu processo. Em contrapartida, os trabalhos de Montanari et al. (2021), Hai et al. (2021) e Rao et al. (2019) receberam ✓ por introduzirem materiais de preenchimento aos quais os autores atribuem características ambientais favoráveis — como o acrilato de limoneno de base biológica, a quitosana associada a nanofibras de celulose e o PVA, descrito pelos autores como solúvel em água e biodegradável —, tornando o material de infiltração um pilar central na construção da alegação de sustentabilidade da rota proposta.

A análise das publicações selecionadas revela uma tendência recorrente na literatura: a atribuição do rótulo de “sustentável” ou “ecologicamente correto” ao produto final pelo simples fato de se utilizar a madeira — um recurso natural, abundante e renovável — como suporte estrutural. No entanto, ao examinar rigorosamente as rotas de processamento descritas nos estudos, constata-se que a caracterização da sustentabilidade é frequentemente parcial e centrada em vantagens pontuais, omitindo impactos ambientais relevantes ao longo da cadeia de fabricação.

A premissa de que a madeira transparente é intrinsecamente ecológica entra em contradição quando se analisa a composição volumétrica do compósito final. A estrutura vegetal deslignificada atua apenas como um gabarito poroso, enquanto a matriz polimérica de preenchimento é responsável por cerca de 70% do volume total do material (MONTANARI et al., 2021). Em diversas rotas convencionais, o preenchimento dos lumens celulares é realizado com polímeros sintéticos de origem petroquímica, como resinas epóxi e PMMA (LI et al., 2017; MI et al., 2020). Em contraste, estudos mais recentes exploram matrizes de base biológica, como o acrilato de limoneno desenvolvido por Montanari et al. (2021) e sistemas à base de quitosana e nanofibras de celulose (HAI et al., 2021).

O processo de conversão da madeira em um meio opticamente transparente exige duas etapas intensivas: a remoção/modificação da lignina e a impregnação do polímero. As rotas químicas convencionais por imersão envolvem o tratamento térmico prolongado (entre 6 e 12 horas) em soluções alcalinas ou oxidantes (LI et al., 2017; XIA et al., 2021). Esses procedimentos podem demandar consumo significativo de energia, água e reagentes químicos e gerar correntes de efluentes que precisam ser consideradas na avaliação ambiental da rota.

Além disso, para viabilizar a infiltração de resinas hidrofóbicas, a madeira modificada precisa passar por etapas sucessivas de troca de solventes incluindo sistemas à base de etanol e acetona em algumas rotas (HAI et al., 2021). O volume de rejeitos líquidos e compostos orgânicos voláteis gerados nessas etapas intermediárias raramente é contabilizado na pegada ecológica do material.

Diversos autores buscam propor rotas alternativas para mitigar esses gargalos, tais como: i) Redução de etapas e insumos: adoção de branqueamento superficial por pincelamento auxiliado por radiação solar (XIA et al., 2021), deslignificação por vapor (LI et al., 2019) ou reações de modificação sem uso de solvente (MONTANARI et al., 2021);

ii) Matrizes alternativas: Utilização de sistemas de base aquosa como o PVA (RAO et al., 2019), biopolímeros como quitosana e nanofibras de celulose (HAI et al., 2021), ou monômeros sintetizados a partir de resíduos industriais cítricos (como o acrilato de limoneno) (MONTANARI et al., 2021). Embora essas propostas representem avanços no campo da química verde, a ausência de um balanço quantitativo rigoroso de massa e energia impede afirmar se os novos processos são globalmente sustentáveis em escala industrial.

A fundamentação da sustentabilidade nos artigos analisados apoia-se predominantemente nos benefícios potenciais durante a fase de uso do material. Os autores destacam o baixo coeficiente de condutividade térmica da madeira transparente em relação ao vidro comercial, demonstrando seu potencial para reduzir o consumo de energia na climatização e iluminação de edifícios eficientes. Entretanto, focar exclusivamente na fase de aplicação gera uma lacuna analítica. Para fundamentar cientificamente as alegações de sustentabilidade, é indispensável a realização de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) abrangente, cobrindo as etapas de extração de matérias-primas, síntese de reagentes, consumo energético de fábrica, geração de resíduos e destinação final (RAI et al., 2022).

Sem uma ACV quantitativa não é possível determinar se a economia de energia obtida na iluminação/climatização de um edifício compensa a energia embutida e os impactos ambientais acumulados no processamento químico da madeira. Ignoram-se os impactos do fim de vida do compósito, visto que a combinação de fibras vegetais com matrizes poliméricas reticuladas inviabiliza a reciclagem convencional e a compostagem natural.

5. Conclusões

O presente artigo abordou a caracterização das alegações de sustentabilidade associadas às diferentes rotas tecnológicas de processamento empregadas na produção de madeira

transparente. O trabalho teve como objetivo geral analisar como a literatura científica caracteriza a sustentabilidade dessas rotas, identificando os principais aspectos mobilizados pelos autores para fundamentar suas alegações e as dimensões do material e do processo que são efetivamente consideradas ou omitidas nessa construção

Para alcançar esse objetivo, foi desenvolvida uma análise comparativa da literatura. A pesquisa selecionou sete estudos experimentais que associavam explicitamente suas rotas a atributos como caráter sustentável ou de origem biológica, aplicando uma matriz de análise composta por sete dimensões: matéria-prima, modificação da madeira, consumo de recursos, características do processamento, material de infiltração, desempenho e escalabilidade.

Os resultados demonstraram um padrão homogêneo na justificativa da sustentabilidade no que diz respeito às etapas de modificação da estrutura lignocelulósica, redução de reagentes e eficiência na fase de uso. Em contrapartida, identificou-se uma descontinuidade marcante na dimensão do material de infiltração, visto que trabalhos ainda utilizam polímeros sintéticos de origem petroquímica (como resinas epóxi e PMMA) sem integrá-los na avaliação ambiental.

Constatou-se que a caracterização da sustentabilidade na literatura é predominantemente parcial e qualitativa, pautada na presença de biomassa renovável, com consideração limitada e não sistemática dos impactos associados ao consumo de energia, uso de solventes e fim de vida.

O trabalho contribui para o campo de materiais ao evidenciar que a utilização de uma matéria-prima renovável não assegura a sustentabilidade do compósito final. Ao sistematizar as lacunas argumentativas dos estudos experimentais, a pesquisa fornece uma estrutura analítica que orienta o desenvolvimento de rotas de processamento ambientalmente mais consistentes.

A limitação deste estudo reside no fato de sua análise ter se baseado na base descritiva e argumentativa disponibilizada pelos autores dos artigos selecionados, sem realizar medições laboratoriais diretas de efluentes ou simulações numéricas de inventário do ciclo de vida.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se a realização de ACV quantitativas e abrangentes para as diferentes rotas de fabricação da madeira transparente. Esses estudos devem incluir balanços de massa e energia, a contabilização das lavagens com solventes e a investigação de alternativas para a reciclagem ou biodegradação do compósito ao término de sua vida útil.

Referências

CARVALHO, R. I. D.; SILVA, H. C. G.; SILVA, E. E.; LAGE, M. M.; AYRES, E.; SILVA, M. C. Desenvolvimento de uma “madeira transparente” a partir de pecíolo de buriti e resina epóxi. In: CONGRESSO DE PESQUISA, EXTENSÃO E ENSINO, 2., Itabira. **Anais...** Itabira: UNIFEI, 2018.

CHEN, C.; KUANG, Y.; ZHU, S.; BURGERT, I.; KEPLINGER, T.; GONG, A.; LI, T.; BERGLUND, L.; EICHHORN, S. J.; HU, L. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. **Nature Reviews Materials**, v. 5, p. 642-666, 2020.

GOLDHAHN, C.; CABANE, E.; CHANANA, M. Sustainability in wood materials science: an opinion about current material development techniques and the end of lifetime perspectives. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 379, n. 2206, 2021, 20200339.

GULLO, F.; MESSORI, M.; PALMERO, P. Transparent wood for a bio-based future: A critical review. **Applied Materials Today**, v. 49, 2026, 103168.

HAI, L. V.; MUTHOKA, R. M.; PANICKERA, P. S.; AGUMBA, D. O.; PHAM, H. D.; KIM, J. All-biobased transparent-wood: A new approach and its environmental-friendly packaging application. **Carbohydrate Polymers**, v. 264, 118012, 2021.

LI, H.; GUO, X.; HE, Y. *et al.* A green steam-modified delignification method to prepare low-lignin delignified wood for thick, large highly transparent wood composites. **Journal of Materials Research**, v. 34, p. 932–940, 2019.

LI, Y.; FU, Q.; YANG, X.; BERGLUND, L. Transparent wood for functional and structural applications. **Philosophical Transactions of the Royal Society A:** Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 376, n. 2112, 2018, 20170182.

LI, Y.; FU, Q.; ROJAS, R.; YAN, M.; LAWOKO, M.; BERGLUND, L. Lignin-retaining transparent wood. **ChemSusChem**, v. 10, n. 17, p. 3445–3451, 2017.

MARIN, J. **Madeira transparente é mais resistente e isolante que o vidro**. 2021. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/tecmundo/stem/210582-madeira-transparente-resistente-isolante-vidro/?srsltid=AfmBOoqUqh_95z1aHBXm-XPCPGSMi1IxToxxGZDf8WeRVnlVKBRYr8nZ>. Acesso em: 14 set. 2026.

MI, R.; CHEN, C.; KEPLINGER, T. *et al.* Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings. **Nature Communications**, v. 11, 3836, 2020.

MONTANARI, C.; OGAWA, Y.; OLSÉN, P.; BERGLUND, L. A. High performance, fully bio-based, and optically transparent wood biocomposites. **Advanced Science**, v. 8, n. 12, 2100559, 2021.

RAI, R.; RANJAN, R.; DHAR, P. Life cycle assessment of transparent wood production using emerging technologies and strategic scale-up framework. **Science of the Total Environment**, v. 846, 157301, 2022.

RAO, A. N. S.; NAGARAJAPPA, G. B.; NAIR, S.; CHATHOTH, A. M.; PANDEY, K. K. Flexible transparent wood prepared from poplar veneer and polyvinyl alcohol. **Composites Science and Technology**, v. 182, 107719, 2019.

VINOD, A.; SANJAY, M. R.; SUCHART, S.; JYOTISHKUMAR, P.; ATHIJAYAM, A.; SREEJITH, M. P.; *et al.* Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, 2020, 120978.

WU, J.; YE, H.; LI, S.; QUE, Z.; PENG, Y.; CAI, L.; XIA, C. Life cycle assessment of transparent wood in building industry: a sustainable solution for global warming mitigation. **Construction and Building Materials**, v. 438, 2024, 137303.

XIA, Q.; CHEN, C.; LI, T.; HE, S.; GAO, J.; WANG, X.; HU, L. Solar-assisted fabrication of large-scale, patternable transparent wood. **Science Advances**, v. 7, n. 5, eabd7342, 2021.