

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta Dissertação será disponibilizado somente a partir de 20/01/2028

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**  
**Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá**

**LUANA CRISTAL LIRYA SILVA**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE NANOFIBRILAS DE CELULOSE EM DOIS DIFERENTES  
ADESIVOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA  
COMPENSADA**

Guaratinguetá  
2025



**LUANA CRISTAL LIRYA SILVA**

**EFEITO DA ADIÇÃO DE NANOFIBRILAS DE CELULOSE EM DOIS DIFERENTES  
ADESIVOS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE MADEIRA  
COMPENSADA**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutora em Engenharia.

Área de Concentração: Materiais

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cristiane Inácio de Campos

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Danielle Goveia

Guaratinguetá

2025

S586e

Silva, Luana Cristal Lirya

Efeito da adição de nanofibrilas de celulose em dois diferentes adesivos utilizados na produção de painéis de madeira compensada / Luana Cristal Lirya Silva - Guaratinguetá, 2026.

138 f : il.

Bibliografia: f. 118-134

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cristiane Inácio de Campos  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Danielle Goveia

1. Nanofibras. 2. Compensados de madeira. 3. Painéis de madeira. 4. Celulose. 5. Construção civil. I. Título.

CDU 69(043)

Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

O presente estudo contribui para o avanço científico e tecnológico ao estudar o uso de nanocelulose como reforço em adesivos para painéis compensados, possibilitando melhorias em suas propriedades físico-mecânicas e redução da emissão de formaldeído. Essa inovação pode impactar a indústria madeireira ao proporcionar alternativas mais sustentáveis e eficientes na fabricação de painéis estruturais. No âmbito econômico, o desenvolvimento de novos compósitos pode gerar oportunidades para a indústria nacional, criando alternativas de produtos engenheirados de madeira. Do ponto de vista social e ambiental, a substituição parcial de resinas convencionais por biomateriais pode diminuir impactos à saúde humana e ao meio ambiente, promovendo alternativas mais seguras e sustentáveis para a construção civil. Assim, a presente pesquisa favorece a internacionalização do conhecimento, pois o uso de nanocelulose é uma tendência global na engenharia de materiais. A pesquisa está em consonância com alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela ONU, podendo-se destacar as ODSs 9, 11 e 12 que estão relacionados a indústria e inovação, a cidades e comunidade sustentáveis e, também consumo e produção responsáveis.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This study contributes to scientific and technological advancement by investigating the nanocellulose's use as reinforcement in adhesives for plywood panels, enabling improvements in their physical-mechanical properties and reducing formaldehyde emissions. This innovation can impact the wood industry by providing more sustainable and efficient alternatives for manufacturing structural panels, fostering a less dependent sector on petroleum-derived products. In economic terms, the new composites developments can create opportunities for the national industry, offering alternative engineered wood products. From a social and environmental perspective, partially replacing conventional resins with biomaterials can mitigate impacts on human health and the environment, promoting safer and more sustainable alternatives for the construction sector. Thus, this research fosters the internationalization of knowledge, as nanocellulose's use is a global trend in materials engineering. The research is in line with several of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs),

particularly SDGs 9, 11, and 12, which are related to industry and innovation, sustainable cities and communities, as well as responsible consumption and production.

## LUANA CRISTAL LIRYA SILVA

Efeito da adição de nanofibrilas de celulose em dois diferentes adesivos utilizados na produção de painéis de madeira compensada


Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Data da defesa: 20/01/2026

Banca Examinadora:

 Documento assinado digitalmente  
**CRISTIANE INACIO DE CAMPOS**  
Data: 21/01/2026 16:59:48-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. CRISTIANE INÁCIO DE CAMPOS  
UNESP

 Documento assinado digitalmente  
**ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO**  
Data: 20/01/2026 18:45:19-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO  
UFSC

 Documento assinado digitalmente  
**MARIA FATIMA DO NASCIMENTO**  
Data: 02/02/2026 19:26:06-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. MARIA FÁTIMA DO NASCIMENTO  
USP

 Documento assinado digitalmente  
**MARILIA DA SILVA BERTOLINI**  
Data: 21/01/2026 08:46:13-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. MARILIA DA SILVA BERTOLINI  
UNESP

 Documento assinado digitalmente  
**GRETTA LARISA AURORA ARCE FERRUFINO**  
Data: 21/01/2026 17:23:20-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra GRETTA LARISA AURORA ARCE FERRUFINO  
INPE

JANEIRO 2026

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por guiar meu caminho e me fortalecer a cada dia. À toda minha família, pelo amor e incentivo constantes, em especial aos meus pais, ao meu marido Felipe e à minha filha Amira, que são minha maior fonte de motivação.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Cristiane, sou imensamente grata pelo apoio, dedicação e conhecimento compartilhado ao longo desta jornada. À minha coorientadora, Prof.<sup>a</sup> Danielle, agradeço o suporte fundamental no desenvolvimento do trabalho com as nanoceluloses.

Aos colegas do LaMCoL, agradeço pelos momentos de aprendizado e companheirismo, com destaque especial ao Sandro, Vítor, Maria Fernanda e Manu. Aos técnicos Alex, Juscelino e Tiago registro minha sincera gratidão pelo auxílio constante, pela atenção e comprometimento em diversas etapas da pesquisa.

Também expresso minha gratidão às empresas parceiras pela doação dos materiais essenciais para a realização deste estudo (lâminas e adesivos).

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro, por meio do Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O desenvolvimento de novos materiais tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionado pela busca por soluções sustentáveis e de alto desempenho mecânico. Nesse contexto, o uso de nanomateriais, especialmente nanofibrilas de celulose (NFCs), destaca-se como alternativa para aprimorar adesivos aplicados em painéis compensados. Este estudo avaliou a substituição de 5% e 10% dos adesivos fenol-formaldeído (FF) e poliuretano bicomponente (PU) por NFC, sob forma de suspensão aquosa a 3%, na fabricação de painéis compensados produzidos com lâminas de *Eucalyptus grandis*. Os painéis foram manufaturados segundo parâmetros industriais e submetidos a ensaios físicos e mecânicos de densidade, teor de umidade, inchamento, absorção de água, flexão estática e cisalhamento na linha de cola, conforme normas da ABNT. Os adesivos foram caracterizados quanto à viscosidade, teor de sólidos e gel-time. Também foram realizadas análises de termogravimetria, FTIR e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados indicaram que a incorporação de 5% de NFC favoreceu a interação adesivo-madeira, promovendo melhorias nas propriedades físico-mecânicas dos painéis, especialmente no módulo de ruptura e no módulo de elasticidade, com maior destaque para os painéis produzidos com PU. As análises de termogravimetria, FTIR e MEV mostraram a interação entre a NFC e os componentes do PU, com uma estrutura mais porosa quando em porcentagens maiores, além de uma melhor dispersão da nanocelulose em ambos os adesivos para o teor de 5%. A incorporação de NFCs diminuiu a viscosidade, o teor de sólidos e o gel-time dos dois adesivos estudados. Assim, a substituição de 10% comprometeu o desempenho mecânico, indicando que 5% é a concentração mais adequada. Conclui-se que a incorporação de NFC é uma alternativa viável para melhorar o desempenho de painéis compensados destinados à construção civil.

**Palavras-chave:** Compósito laminado de madeira; Nanofibrilas de celulose; Adesivos sintéticos; Propriedades físico-mecânicas; Construção civil.

## ABSTRACT

The development of new materials has intensified in recent decades, driven by the search for sustainable solutions with high mechanical performance. In this context, the use of nanomaterials, particularly cellulose nanofibrils (NFC), stands out as an alternative to enhance adhesives applied in plywood panels. This study evaluated the replacement of 5% and 10% of phenol-formaldehyde (PF) and two-component polyurethane (PU) adhesives with NFC in the form of a 3% aqueous suspension in the manufacture of plywood panels produced from *Eucalyptus grandis* veneers. The panels were manufactured according to industrial parameters and subjected to physical and mechanical tests, including density, moisture content, thickness swelling, water absorption, static bending, and shear strength along the glue line, in accordance with ABNT standards. The adhesives were characterized in terms of viscosity, solid content, and gel-time. Thermogravimetric analysis, FTIR, and scanning electron microscopy were also performed. The results indicated that incorporating 5% NFC enhanced the adhesive-wood interaction, improving the physical and mechanical properties of the panels, especially the modulus of rupture and modulus of elasticity, with greater improvements observed in panels produced with PU. Thermogravimetric, FTIR, and SEM analyses showed interactions between NFC and the PU components, a more porous structure at higher NFC contents, and better dispersion of nanocellulose in both adhesives at the 5% level. Incorporating NFC reduced the viscosity, solid content, and gel-time of both adhesives. Consequently, a 10% replacement compromised mechanical performance, indicating that 5% is the most suitable concentration. It is concluded that the incorporation of NFC is a viable alternative to improve the performance of plywood panels intended for civil construction.

**Keywords:** Laminated composite; Cellulose nanofibrils; Synthetic adhesives; Physical-mechanical properties; Civil construction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mercado de painéis a base de madeira por aplicação.....	20
Figura 2 - Projeção em U\$ para o mercado de painéis a base de madeira .....	21
Figura 3 - Destino da produção brasileira de painéis de madeira (milhões de m <sup>3</sup> )....	22
Figura 4 - Histórico de venda doméstica de painéis de madeira (milhões de m <sup>3</sup> ) .....	23
Figura 5 - Principais países produtores de painéis de madeira em 2024 (m <sup>3</sup> ).....	23
Figura 6 - Destinos das exportações brasileiras de painéis em 2024 (%) .....	24
Figura 7 - Produção de laminados em m <sup>3</sup> de 1993 a 2023 .....	25
Figura 8 - Panorama de mercado de compensados e LVL por região: (a) importação; (b)exportação .....	26
Figura 9 - Destino da produção de pisos laminados no Brasil em milhões de m <sup>3</sup> .....	27
Figura 10 - Trabalhos publicados a partir de 1950, contendo o termo “plywood” .....	29
Figura 11 - Mapeamento de principais autores que publicaram sobre o tema .....	31
Figura 12 - Mapeamento das principais palavras-chave associadas a “plywood .....	32
Figura 13 - Trabalhos publicados a partir de 2006, contendo o termo “nanocellulose” .....	33
Figura 14 - Mapeamento das principais palavras-chave associadas a “nanocellulose” .....	34
Figura 15 - Comparação entre densidades de madeira .....	42
Figura 16 - Molécula do fenol-formaldeído .....	46
Figura 17 - Estrutura química do óleo de mamona .....	49
Figura 18 - Configuração do painel compensado: camadas defasadas em 90° .....	50
Figura 19 - Molécula da celulose evidenciando a unidade de glicose .....	55
Figura 20 - Produção de nanofibras celulósicas.....	57
Figura 21 - Nanofibrilas de celulose observadas atrás de MET .....	60
Figura 22 - Lâminas de eucalipto seccionadas para a produção dos painéis.....	64
Figura 23 - Secagem das lâminas em estufa com tabiques para permitir secagem homogênea.....	65
Figura 24 - Produção dos painéis de madeira compensada .....	66
Figura 25 - Corpos de prova dimensionados para os ensaios .....	67
Figura 26 - Ensaio de flexão estática.....	71
Figura 27 - Ensaio de cisalhamento na linha de cola .....	72
Figura 28 - Ensaio de viscosidade .....	74

Figura 29 - Análise termogravimétrica .....	76
Figura 30 - Ensaio de microscopia eletrônica de varredura .....	77
Figura 31 - Ensaio de espectroscopia de infravermelho. ....	78
Figura 32 - Gráfico de Interação para resultados médios de densidade.....	80
Figura 33 -Gráfico de Interação para resultados médios de absorção (%).....	84
Figura 34 - Gráfico de Interação para MOE paralelo às fibras .....	86
Figura 35 - Gráfico de Interação para resultados de MOE perpendicular às fibras ...	87
Figura 36 - Gráfico de Interação para resultados médios de MOR paralelo às fibras .....	89
Figura 37 - Gráfico de Interação para resultados médios de MOR perpendicular às fibras.....	89
Figura 38 - Valores de resistência ao cisalhamento segundo ABNT NBR 12466-2:2006 .....	91
Figura 39 - Gráfico de Interação para resultados médios de cisalhamento (MPa) ....	92
Figura 40 – Análise TGA do adesivo fenol-formaldeído sem adição de nanocelulose .....	97
Figura 41 - Análise TGA do adesivo fenol-formaldeído com 5% de nanocelulose ....	97
Figura 42 - Análise TGA do adesivo fenol-formaldeído com 10% de nanocelulose ..	98
Figura 43 - Análise termogravimétrica do adesivo poliuretano sem nanocelulose ....	99
Figura 45 - Análise termogravimétrica do adesivo poliuretano com 10% de nanocelulose .....	100
Figura 44 - Análise termogravimétrica do adesivo poliuretano com 5% de nanocelulose .....	100
Figura 46 - Resina poliuretana com 0% de nanocelulose: (a) Local analisado; (b) x50 .....	101
Figura 47 - MEV poliuretana 1000x .....	102
Figura 48 - Resina poliuretana com 5% de nanocelulose: (a) Local analisado; (b) x50 .....	103
Figura 49 - Resina poliuretana com 10% de nanocelulose: (a) Local analisado; (b) x50 .....	103
Figura 50 - Amostras de resina poliuretana durante a cura: (a) 0% de nanocelulose, (b) 5% de nanocelulose; (c) 10% de nanocelulose.....	104
Figura 51 - Resina fenólica sem nanocelulose: (a) Local analisado; (b) x50 .....	105
Figura 52 - Resina fenólica com 5% de nanocelulose: (a) Local analisado; (b) x50	105

Figura 53 - Resina fenólica com 10% de nanocelulose: (a) Local analisado; (b) x50 .....	106
Figura 54 - MEV de composto de resina fenol-formaldeído com bio-óleo .....	107
Figura 55 - FTIR nanofibrilas de celulose (NFC) .....	108
Figura 56 - FTIR para amostras de celulose de eucalipto (EUC), nanofibrilas de celulose (NFC) e nanocristais de celulose (NCC). .....	109
Figura 57 - FTIR para o adesivo fenol-formaldeído .....	110
Figura 58 - FTIR o adesivo poliuretano .....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados para “ <i>plywood</i> ” .....	30
Tabela 2 - Resultados de palavras-chave associadas a “ <i>plywood</i> ” .....	32
Tabela 3 - Resultados de palavras-chaves associadas a nanocelulose .....	34
Tabela 4 - Resultados para combinação de palavras-chave.....	35
Tabela 5 - Principais referências encontradas sobre o assunto.....	36
Tabela 6 - Descrição dos documentos selecionados e principais descobertas .....	37
Tabela 7 - Composições dos tratamentos realizados com duas resinas. ....	66
Tabela 8 - Resultados médios obtidos para densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> ).....	79
Tabela 9 - Resultados obtidos para teor de umidade (%) .....	81
Tabela 10 - Resultados obtidos para inchamento em espessura (%).....	82
Tabela 11- Resultados obtidos para absorção de água (%) .....	83
Tabela 12 - Resultados obtidos para Módulo de Elasticidade (MOE).....	85
Tabela 13 - Resultados obtidos para Módulo de Ruptura (MOR) .....	88
Tabela 14 - Resultados obtidos para resistência ao cisalhamento (MPa) .....	91
Tabela 15 - Resultados obtidos para a viscosidade em cP.....	94
Tabela 16 - Resultados obtidos para o gel-time dos adesivos .....	95
Tabela 17 - Resultados obtidos para o teor de sólidos dos adesivos .....	96

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BPF	Composto desivo de fenol-formaldeído com bio-óleo
CAGR	Compound Annual Growth Rate
EMIC	Máquina Universal de Ensaio
EN	Norma Européia
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
FF	Fenol-formaldeído
FRP	Polímeros reforçados com fibras
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
HDF	High Density Fiberboard
IPEF	Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais
JIS	Japanese Industrial Standards
LVL	Laminated Veneer Lumber
MDF	Medium Density Fiberboard
MDP	Medium Density Fiberboard
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MFC	Celulose Microfibrilada
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
NCC	Celulose Nanocristalina
NFC	Celulose Nanofibrilada
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde

ONU	Organização das Nações Unidas
OSB	Oriented Strand Board
PSF	Ponto de saturação das fibras
PU	Poliuretana
PVA	Poliacetato de Vinila
TGA	Termogravimetria
TU	Teor de Umidade
UF	Ureia-Formaldeído

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
3.1	PANORAMA DO MERCADO DE PAINÉIS .....	19
3.1.1	Panorama do mercado de laminados .....	25
3.1.2	Panorama de mercado de compensados no Brasil .....	26
3.2	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA .....	28
3.3	MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS.....	41
3.3.1	Madeira.....	41
<b>3.3.1.1</b>	<b><i>Eucalipto</i> .....</b>	<b>43</b>
3.3.2	Adesivo.....	45
<b>3.3.2.1</b>	<b><i>Fenol-formaldeído</i> .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.2.2</b>	<b><i>Poliuretana</i> .....</b>	<b>48</b>
3.4	PAINÉIS COMPENSADOS.....	49
3.4.1	Propriedades dos painéis compensados .....	51
3.5	CELULOSE E NANOCELULOSE .....	54
3.5.1	Nanofibrilas de celulose .....	59
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO DE LITERATURA .....	61
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODO.....</b>	<b>63</b>
4.1	PRODUÇÃO DOS PAINÉIS .....	63
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS PAINÉIS .....	67
4.2.1	Propriedades Físicas.....	67
4.2.2	Propriedades Mecânicas.....	70
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	72
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO ADESIVO.....	73
4.4.1	Viscosidade .....	73
4.4.2	Gel-time .....	74
4.4.3	Teor de sólidos .....	75
4.4.4	Termogravimetria .....	75
4.4.5	Microscopia eletrônica de varredura .....	76
4.4.6	Espectroscopia de Infravermelho.....	77
<b>5</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO .....</b>	<b>79</b>

5.1	PROPRIEDADES FÍSICAS.....	79
5.1.1	Densidade aparente .....	79
5.1.2	Teor de umidade .....	81
5.1.3	Inchamento em espessura 24h.....	82
5.1.4	Absorção de água após imersão 24h .....	83
5.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	84
5.2.1	Módulo de elasticidade (MOE).....	84
5.2.2	Módulo de Ruptura (MOR).....	88
5.2.3	Cisalhamento na linha de cola .....	90
5.3	RESULTADO DAS PROPRIEDADES DO ADESIVO .....	93
5.3.1	Viscosidade .....	94
5.3.2	Gel-time .....	95
5.3.3	Teor de Sólidos .....	96
5.3.4	Termogravimetria .....	97
5.3.5	Microscopia eletrônica de Varredura .....	101
5.3.6	Espectroscopia de Infravermelho.....	108
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>115</b>
	REFERÊNCIAS.....	118
	DADOS CURRICULARES.....	135

## 1 INTRODUÇÃO

A grande disponibilidade de recursos florestais existente no Brasil possibilita o constante crescimento de setores industriais que utilizam a madeira como matéria-prima. O setor dos painéis à base de madeira vem buscando constantemente novos métodos de produção e novas tecnologias (IBÁ, 2025; IPEF, 2023). Procurando aumentar o aproveitamento da madeira, segundo Pramreiter et al. (2023), foram desenvolvidos diversos produtos e técnicas produtivas para maximizar o uso da matéria-prima disponível, levando a uma geração de diferentes produtos a partir da sua reconstrução.

Assim, os painéis à base de madeira, que proporcionam o melhor aproveitamento dessa, apresentam crescente aplicação em diversos segmentos industriais, destacando-se a indústria moveleira e a construção civil (Araújo, 2024).

De acordo com Amarasinghe (2024), diferentes painéis são comercializados atualmente no Brasil, dentre eles: o compensado - lâminas; o MDP (Medium Density Particleboard) e o OSB (Oriented Strand Board) - partículas; o MDF (Medium Density Fiberboard) e o HDF (High Density Fiberboard) - fibras. Em busca constante de evolução tecnológica e melhora da qualidade, conhecer e entender suas principais características como a variação das dimensões, controle e melhora das propriedades físico-mecânicas, acabamentos superfícies, uniformidade e versatilidade, são essenciais para que se obtenha um produto final com melhores propriedades e desempenho.

Assim, dentre os painéis de uso estrutural, é possível destacar o compensado como produto de madeira engenheirada, constituído de lâminas de madeira cruzadas em camadas em número ímpar, consolidado através de adesivo, pressão e calor (Krefta et al. 2022).

Segundo Bekhta et al. (2016), o compensado apresenta propriedades únicas, resultante de sua estrutura em camadas, caracterizando vantagens em suas propriedades mecânicas, que possibilitam que este seja um dos produtos mais importantes dos materiais à base de madeira na indústria global.

Ferreira (2022) afirma que o compensado, quando comparado à madeira maciça, apresenta propriedades mecânicas mais isotrópicas, além de resistência à

ruptura superior. Segundo o autor, as propriedades desse painel dependem do adesivo, bem como da quantidade e qualidade das lâminas de madeira utilizadas.

Ao se tratar de painéis para uso estrutural, o adesivo empregado é decisivo para atingir melhores propriedades do produto. Em chapas destinadas ao uso externo, como na construção civil, o adesivo fenol-formaldeído (FF) é mais comumente utilizada. Entretanto, a resina à base de formaldeído é um dos principais causadores de problemas com toxicidade, pois parte do formaldeído presente nas resinas não reage, ficando retido no painel e liberado posteriormente (Nakano et al., 2018).

Além disso, a maior parte das resinas utilizadas na fabricação de painéis é proveniente da sintetização por meio de compostos orgânicos provenientes do petróleo que, além apresentarem riscos à saúde, não são renováveis (Magalhães et al., 2017).

Segundo Ferreira et al. (2012), com o desenvolvimento de novos painéis à base de madeira, passou a existir a necessidade de adesivos que exercessem menor agressividade ao meio ambiente. Para isso, pesquisas estão sendo desenvolvidas, a fim de diminuir a emissão de poluentes por estes adesivos, sem prejudicar as propriedades dos painéis produzidos.

Novas pesquisas também têm surgido com o intuito de aprimorar as propriedades dos painéis, como o uso de materiais nanoestruturados, que tem demonstrado capacidade de aprimorar as propriedades físico-mecânicas do painel, ao serem adicionadas ao adesivo (Silva et al. 2019; Silva et al. 2025; Hariry et al. 2025).

Além disso, aumenta-se o interesse por um biomaterial com baixa toxicidade e biodegradabilidade, além de alta resistência mecânica, que vem ganhando espaço no mercado, sendo essa a nanocelulose (Sacui et al., 2014).

Assim, a utilização da celulose em compósitos surge principalmente para explorar sua alta resistência e rigidez, demonstrando grande potencial de reforço, se comparado a outros materiais (Panthapulakkal e Sain, 2012). A Figura 1 apresenta o gráfico do mercado de painéis de madeira por aplicação.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitiram compreender os efeitos da incorporação de nanocelulose fibrilada (NFC) nas propriedades dos painéis compensados, contribuindo para a busca por alternativas inovadoras e sustentáveis para o setor de painéis de madeira.

A avaliação do desempenho físico e mecânico dos painéis indicou que a substituição parcial do adesivo por NFC influenciou significativamente as propriedades dos materiais. De modo geral, a substituição de 5% de adesivo por NFC promoveu melhorias nas propriedades dos painéis, tanto para o adesivo fenol-formaldeído (FF) quanto para o poliuretano bicomponente (PU). Em contrapartida, quando a substituição foi elevada para 10%, algumas propriedades apresentaram redução, especialmente nos painéis produzidos com FF.

No que se refere às propriedades mecânicas, observou-se aumento do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (MOE) com a incorporação de 5% de NFC, com destaque para os painéis produzidos com PU. Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito de reforço proporcionado pela nanocelulose, decorrente de sua elevada relação de aspecto e resistência mecânica. Entretanto, a substituição de 10% de adesivo por NFC resultou na redução do desempenho mecânico em algumas condições, sugerindo que concentrações mais elevadas favorecem a aglomeração das fibras, prejudicando a interação entre o adesivo e o nanomaterial, conforme também relatado na literatura.

Em relação às propriedades físicas, a incorporação de NFC contribuiu positivamente para a densidade dos painéis, especialmente na substituição de 5%, enquanto a substituição de 10% apresentou tendência de redução desse parâmetro. Quanto ao teor de umidade, os painéis produzidos com PU apresentaram valores inferiores em comparação aos painéis com FF, não sendo observada diferença estatística significativa entre as porcentagens de NFC avaliadas. No que diz respeito à absorção de água e ao inchamento em espessura, os painéis contendo NFC apresentaram menor variação dimensional, indicando maior estabilidade física do material. Esse efeito foi mais pronunciado nos painéis produzidos com PU, devido ao caráter hidrofóbico dessa resina.

A influência da NFC nos adesivos avaliados demonstrou que a resina PU apresentou interação mais favorável com a nanocelulose, resultando em melhores

propriedades físicas e mecânicas em comparação ao adesivo FF. As análises realizadas nos adesivos corroboram esses resultados, indicando interação entre os componentes do sistema e melhor dispersão da nanocelulose quando utilizada em menores concentrações.

De forma geral, os resultados das análises físico-químicas e morfológicas evidenciaram que:

- a concentração de 5% de NFC promoveu melhor dispersão da nanocelulose nas resinas;
- concentrações mais elevadas favoreceram a formação de estruturas mais porosas e heterogêneas;
- maiores porcentagens de NFC tendem a provocar aglomeração das nanofibrilas, prejudicando a interação matriz-reforço.

Ao comparar os painéis produzidos, verificou-se que os melhores desempenhos foram obtidos nos painéis produzidos com PU contendo 5% de NFC, superando inclusive alguns valores relatados na literatura. Esses resultados demonstram o potencial do uso da nanocelulose como reforço em sistemas adesivos para painéis compensados, possibilitando a obtenção de materiais com propriedades aprimoradas.

A substituição parcial de adesivos por celulose nanofibrilada mostrou-se, portanto, uma estratégia promissora para aprimorar o desempenho de painéis compensados, desde que utilizada em concentrações adequadas. Entre os tratamentos avaliados, a substituição de 5% de adesivo por NFC apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico, estabilidade dimensional e integridade estrutural, além de possibilitar a redução da quantidade de adesivo utilizada no processo de fabricação.

Além dos ganhos técnicos, a redução do consumo de adesivos também representa um benefício ambiental relevante, considerando as emissões de formaldeído associadas ao adesivo FF e a presença de isocianatos na composição da resina PU.

Por fim, os painéis avaliados apresentaram propriedades adequadas para aplicações na construção civil, especialmente em sistemas construtivos industrializados do tipo Light Frame, bem como como substrato para pisos engenheirados, segmento que vem apresentando crescente aceitação no Brasil.

Ressalta-se ainda que os resultados desta pesquisa demonstram alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela ONU, especialmente os ODS 9, ODS 11 e ODS 12.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **ABIMCI**: o mercado de compensados no brasil é tema de painel no woodtrade brazil. ABIMCI, 2024. Disponível em: <https://abimci.com.br/o-mercado-de-compensados-no-brasil-e-tema-de-painel-no-woodtrade-brazil/>. Acesso em: 19 out. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17002**: compensado: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ALEMDAR, A.; SAIN, M. Isolation and characterization of nanofibres from agricultural residues: wheat straw and soy hulls. **Bioresource Technology**, Oxford, v. 99, n. 6, p. 1664-1671, 2008.
- ALILA, S.; BESBES, I.; VILAR, M. R.; MUTJÉ P.; BOUFI. Non-woody plants as raw materials for production of microfibrillated cellulose (MFC): A comparative study. **Industrial Crops and Products**, [S.l.], v. 41, p. 250-259, 2013.
- ALMEIDA, N.F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G.; MENDES, R. F.; SURDI, P.G. Avaliação da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de compensados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 435-443, 2012.
- AMADO, F. D. R. **Produção e aplicação de membranas com polímeros convencionais e polianilina para uso em eletrodialise no tratamento de efluentes industriais**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- AMARAL, W. S.; MENDES, M. T. A.; CÂMARA, J. V. F.; PIEROTE, J. J. A.; REIS, F. S.; MATOS, J. M. E.; FIALHO, A. C. V.; MOURA, W. L. Surface and micromechanical analysis of polyurethane plates with hydroxyapatite for bone structure. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 32, n. 4, p. 202-204, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20220058>. Acesso em: 19 out. 2025.
- AMARASINGHE, I.T.; QIAN, Y.; GUNAWARDENA, T.; MENDIS, P.; BELLEVILLE, B. Composite panels from wood Waste: a detailed review of processes, standards, and applications. **Journal of Composites Science**, Basel, v. 8, n. 10, p. 417, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-477X/8/10/417>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- ARAÚJO, C. K. C.; SALVADOR, R.; PIEKARSKI, C. M.; SOKULSKI, C. C.; DE FRANCISCO, A. C.; DE CARVALHO ARAÚJO CAMARGO, S. K. C. A. C. Circular Economy Practices on Wood Panels: A Bibliographic Analysis. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 4, p. 1057, 2019. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.3390/su11041057>. Acesso em: 19 out. 2025.
- ARAÚJO, C. K. C. **Substituição parcial do adesivo fenol-formaldeído por lignina Kraft na produção de compensado**. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia

Mecânica) – Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/e0c6dc39-d8e9-4838-970e-a839cbec0b18/content>. Acesso em: 10 abr. 2025.

AURIGA, R.; GUMOWSKA, A.; SZYMANOWSKI, K.; WRONKA, A.; ROBLES, E.; OCIPKA, P.; GRZEGORZ, K. Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers. **Composite Structures**, Oxford, v. 248, p. 112533, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112533>. Acesso em: 19 out. 2025.

AYDIN, I.; COLAKOGLU, G.; COLAK, S.; DEMIRKIR, C. Effects of moisture content on formaldehyde emission and mechanical properties of plywood. **Building and Environment**, Oxford, v. 41, n. 10, p. 1311-1316, 2006.

AYRILMIS, N.; LEE, Y.; KWON, J. H.; HAN, T.; KIM, H. Formaldehyde emission and VOCs from LVLs produced with three grades of urea-formaldehyde resin modified with nanocellulose. **Building and Environment**, Oxford, v. 82, p. 82-87, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.009>. Acesso em: 19 out. 2025.

AYRILMIS, N.; KWON, J. H.; LEE, S. H.; HAN, T. H.; PARK, C. W. Microfibrillated-cellulose-modified urea-formaldehyde adhesives with different F/U molar ratios for wood-based composites. **Journal of Adhesion Science and Technology**, Abingdon, v. 30, n. 18, p. 2032–2043, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1175246>. Acesso em: 19 out. 2025.

BAL, B. C.; BEKTAŞ, İ.; MENGELOĞLU, F.; KARAKUŞ, K.; DEMİR, H. Ö. Some technological properties of poplar plywood panels reinforced with glass fiber fabric. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 101, n. 1, p. 952-957, 2015.

BEKHTA, P.; SEDLIAČIK, J.; NOSHCHENKO, G.; KAČÍK, F.; BEKHTA, N. Characteristics of beech bark and its effect on the properties of UF adhesive and on the bond strength and formaldehyde emission of plywood panels. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 79, p. 423–433, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1175246>. Acesso em: 19 out. 2025.

BEKHTA, P. Advances in plywood manufacturing: mechanical properties and sustainability aspects. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 54, n. 6, p. 1235-1251, 2020.

BEKHTA, P. Effect of heat treatment on some physical and mechanical properties of birch plywood. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 78, p. 683–691, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01560-7>. Acesso em: 19 out. 2025.

BEKHTA, P.; HIZIROGLU, S.; SHEPELYUK, O. Properties of plywood manufactured from compressed veneer as building material. **Materials & Design**, Oxford, v. 30, n. 4, p. 947-953, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.001>. Acesso em: 19 out. 2025.

BEKHTA, P.; SALCA, E. A. Influence of veneer densification on the shear strength and temperature behavior inside the plywood during hot press. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 162, n. 10, p. 20-26, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.161>. Acesso em: 19 out. 2025.

BEKHTA, P.; SEDLIAČIK, J.; JONES, D. Effect of short-term thermomechanical densification of wood veneers on the properties of birch plywood. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 76, n. 2, p. 549-562, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-017-1233-4>. Acesso em: 19 out. 2025.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Produção de compensados com 11 espécies do gênero Eucalyptus: avaliação das suas propriedades físico-mecânicas e indicações para utilização. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 63, p. 65-78, 2003. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr63/cap06.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2025.

BURAWSKA, I.; ZBIEĆ, M.; TOMUSIAK, A.; BEER, P. Local reinforcement of timber with composite and lignocellulosic materials. **BioResources**, Raleigh, v. 10, p. 457-468, 2015.

CALVEZ, I.; GARCIA, R.; KOUBAA, A.; LANDRY, V.; CLOUTIER, A. Recent advances in bio-based adhesives and formaldehyde-free technologies for wood-based panel manufacturing. **Current Forestry Reports**, Cham, v. 10, p. 386-400, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00227-3>. Acesso em: 19 out. 2025.

CAMARGOS, C. H. M. **Compósitos de nanocristais e nanofibrilas de celulose: preparação, caracterização e potenciais aplicações em processos de restauração de documentos e obras de arte sobre papel**. 2016. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/0a4509a9-cd08-4928-99d6-68028d041e8e/content>. Acesso em: 25 nov. 2025.

CAI, L.; LI, Y.; LIN, X.; CHEN, H.; GAO, Q.; LI, J. High-performance adhesives formulated from soy protein isolate and bio-based material hybrid for plywood production. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 353, p. 131587, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131587>. Acesso em: 19 out. 2025.

CESAR, A. A. S. **Estudo da interação adesivo-partícula em painéis OSB (Oriented Strand Board)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

CHAKRABARTY, A.; TERAMOTO, Y. Recent advances in nanocellulose composites with polymers: a guide for choosing partners and how to incorporate them. **Polymers**, Basel, v. 10, p. 517, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym10050517>. Acesso em: 19 out. 2025.

CHEN, W.; YU, H.; LIU, Y.; CHEN, P.; ZHANG, M.; HAI, Y. Individualization of cellulose nanofibers from wood using high-intensity ultrasonication combined with

chemical pretreatments. **Carbohydrate Polymers**, Oxford, v. 83, p. 1804–1811, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.040>. Acesso em: 19 out. 2025.

CHEN, Z. Q.; CHEN, Y. F.; LIU, H. B. Pyrolysis of phenolic resin by TG-MS and FTIR analysis. **Advanced Materials Research**, Zurich, v. 631-632, p. 104-109, 2013. Disponível em: <https://www.scientific.net/AMR.631-632.104>. Acesso em: 19 out. 2025.

CHIROMITO, E. M. S. **Nanocompósitos de poli(hidroxibutirato) e poli(ácido láctico) reforçados com celulose nanofibrilada utilizando poli(álcool vinílico) como agente de incorporação do reforço**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-18102021-153322/publico/TeseChiromitoEmanoeleMariaSCorrig.pdf>. Acesso em: 29 set. 2025.

CORREIA, V. C. **Produção de celulose nanofibrilada a partir de polpa organossolve de bambu para nanoreforço de compósitos cimentícios**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

CRAFFORD, P. L.; WESSELS, C. B. A potential new product for roof truss manufacturing: Young, green finger-jointed *Eucalyptus grandis* lumber. **Southern Forests: A Journal of Forest Science**, Grahamstown, v. 78, n. 1, p. 61–71, 2016.

CREWS, K. I. Nonconventional timber construction. *In*: HARRIES, K. A.; SHARMA, B. (ed.). **Nonconventional and Vernacular Construction Materials**. Sawston: Woodhead Publishing, 2016. p. 335–363. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100038-0.00012-3>. Acesso em: 19 out. 2025.

CUI, J.; LU, X.; ZHOU, X.; CHRUSCIEL, L.; DENG, Y.; ZHOU, H.; ZHU, S.; BROSSE, N. Enhancement of mechanical strength of particleboard using environmentally friendly pine (*Pinus pinaster* L.) tannin adhesives with cellulose nanofibers. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 72, n. 1, p. 27-32, 2015.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Alternative castor oil-based polyurethane adhesive used in the production of plywood. **Materials Research**, São Carlos, v. 7, n. 3, p. 413-420, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392004000300008>. Acesso em: 18 out. 2025.

DUFRESNE, A. **Nano-cellulose**: from nature to high performance tailored materials. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co, 2013. 475 p.

EICHHORN, S. J. Cellulose nanowhiskers: promising materials for advanced applications. **Soft Matter**, Cambridge, v. 7, p. 303–315, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C0SM00142B>. Acesso em: 19 out. 2025.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 300**: oriented strand boards (OSB): definitions, classification and specifications. Brussels: EN, 2006.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 310**: wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. Brussels: EN, 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 317**: particleboards and fibreboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water. Brussels: EN, 1993

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 319**: particleboards and fibreboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. Brussels: EN, 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 320**: particleboards and fibreboards. Determination of resistance to axial withdrawal of screws. Brussels: EN, 2011.

EMRE, F.; KIVILCIM, F. Synthesis and Characterization of Cellulose Based Injectable Polyurethane Gels. **Journal of Engineering and Natural Sciences**, Istanbul, v. 4, n. 1, p. 29-36, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.46572/naturengs.1298413>. Acesso em: 19 out. 2025.

FARIA, D.; CANOLA, P. H.; LOPES, T. A.; SCATOLINO, M.; PROTÁSIO, T. D. P.; FONSECA, C.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Adição de nanofibras de celulose em painéis cimento-madeira. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 3., 2017, Florianópolis. **Anais eletrônicos** [...]. Florianópolis: Galoá, 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/cbctem/trabalhos/adicao-de-nanofibras-de-celulose-em-paineis-cimento-madeira?lang=pt-br>. Acesso em: 29 nov. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT**. Roma: FAO, 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#country>. Acesso em: 29 nov. 2025.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. **Progress in Polymer Science**, Oxford, v. 37, n. 11, p. 1552–1596, 2012.

FERNANDES, E. M.; CORREIA, V.; MANO, J. F.; REIS, R. L. Nanocellulose-based composites for structural applications. **Materials Today**, Oxford, v. 24, p. 35-45, 2021.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; SILVA, M. S.; VALARELLI, I. D. Cisalhamento na linha de cola de compensados de Eucalyptus sp. e adesivo PVA. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 2, p. 141-146, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/floram.2012.016>. Acesso em: 19 out. 2025.

FERREIRA, B. S.; SILVA, J. V. F.; CAMPOS, C. I. Static bending strength of heat-treated and chromated copper arsenate-treated plywood. **BioResources**, Raleigh, v. 12, p. 6276-6282, 2017.

FERREIRA, B. S.; ARROYO, F. N.; KONDO, M. Y.; SANTOS, H. F.; BARRETO, R. L.; DIAS, A. M. P. G.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L.; CAMPOS, C. I. Physical and mechanical properties of plywood produced with thermally treated *Pinus taeda* veneers. **Forests**, Basel, v. 13, n. 9, p. 1398, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/9/1398>. Acesso em: 7 set. 2024.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Fiberglass-reinforced glulam beams: Mechanical properties and theoretical model. **Materials Research**, São Carlos, v. 9, p. 263-269, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000300004>. Acesso em: 19 out. 2025.

FRENCH, A. D. Glucose, not cellobiose, is the repeating unit of cellulose and why that is important. **Cellulose**, Dordrecht, v. 24, n. 11, p. 4605–4609, 2017.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials, bond formation and performance. *In*: WOOD HANDBOOK: wood as an engineering material. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. p. 10.1-10.24. (General Technical Report FPL-GTR-190).

GALDINO, D. S.; KONDO, M. Y.; DE ARAUJO, V. A.; FERRUFINO, G. L. A. A.; FAUSTINO, E.; SANTOS, H. F. D.; CHRISTOFORO, A. L.; LUNA, C. M. R.; CAMPOS, C. I. D. Thermal and gluing properties of phenol-based resin with lignin for potential application in structural composites. **Polymers**, Basel, v. 15, p. 357, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15020357>. Acesso em: 19 out. 2025.

GALDINO, D. S.; SILVA, M. F. F.; ARROYO, F. N.; RANGEL, E. C.; CARASCHI, J. C.; SANTOS, H. F. D.; DE FREITAS, L.; CHRISTOFORO, A. L.; DE CAMPOS, C. I. Properties of Plywood Made of Thermally Treated Veneers Bonded with Castor Oil-Based Polyurethane Adhesive. **Forests**, Basel, v. 14, p. 1635, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f14081635>. Acesso em: 19 out. 2025.

GARDNER, D. J.; OPORTO, G. S.; MILLS, R.; SAMIR, M. A. S. A. Adhesion and surface issues in cellulose and nanocellulose. **Journal of Adhesion Science and Technology**, Abingdon, v. 22, p. 545–567, 2008.

GRAND VIEW RESEARCH. **Wood-based panel market**: global industry analysis. San Francisco: Grand View Research, [202-?]. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wood-based-panel-market>. Acesso em: 02 dez. 2025.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; LACERDA, F. das C. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, 2008. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2526>. Acesso em: 16 maio 2025.

GONG, X.; LIU, T.; YU, S.; MENG, Y.; LU, J.; CHENG, Y.; WANG, H. The preparation and performance of a novel lignin-based adhesive without formaldehyde. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 153, p. 112593, 2020.

HABIBI, Y. Key advances in the chemical modification of nanocelluloses. **Chemical Society Reviews**, Cambridge, v. 43, p. 1519–1542, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C3CS60204D>. Acesso em: 19 out. 2025.

HALDAR, D.; PURKAIT, M. K. Micro and nanocrystalline cellulose derivatives of lignocellulosic biomass: A review on synthesis, applications and advancements. **Carbohydrate Polymers**, Oxford, v. 250, p. 116937, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116937>. Acesso em: 19 out. 2025.

HARIRY, A.; MARDAWATI, E.; ISWANTO, A. H.; KARLIATI, T.; ZAINI, L. H.; LUBIS, M. A. R. Nanocellulose-based adhesives for sustainable wood-polymer composites: recent advancement and future perspective. **Journal of Renewable Materials**, Henderson, v. 13, p. 773-798, 2025.

HASSAN, M. L.; MATHEW, A. P.; HASSAN, E. A.; EL-WAKIL, N.; OKSMAN, K. Nanofibers from bagasse and rice straw: process optimization and properties. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 46, p. 193-205, 2012.

HE, Z.; ZHANG, Y.; WEI, W. Formaldehyde and VOC emissions at different manufacturing stages of wood-based panels. **Building and Environment**, Oxford, v. 47, p. 197-204, 2012.

HOONG, Y. B.; PARIDAH, M. T.; LOH, Y. F.; KOH, M. P.; LUQMAN, C. A. Influence of processing parameters on the properties of plywood bonded with oil palm starch-based adhesive. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 50, p. 441-446, 2013.

HU, L.; PAN, H.; ZHOU, Y.; ZHANG, M. Methods to improve lignin's reactivity as a phenol substitute and as replacement for other phenolic compound: a brief review. **BioResources**, Raleigh, v. 6, n. 3, p. 3515-3525, 2011.

HUBBE, M. A.; ROJAS, O. J.; LUCIA, L. A.; SAIN, M. Cellulosic nanocomposites: a review. **BioResources**, Raleigh, v. 3, n. 3, p. 929-980, 2008.

HUBBE, M. A.; FERRER, A.; TYAGI, P.; YIN, Y.; SALAS, C.; PAL, L.; ROJAS, O. Nanocellulose in thin films, coatings, and plies for packaging applications: A review. **BioResources**, Raleigh, v. 12, n. 1, p. 2143–2233, 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. Mercado de construção civil em madeira no Brasil: perspectivas e desafios. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 48, p. 115-130, 2023. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr48/ipef-sertec-48-115.pdf>. Acesso em: 16 maio 2024.

IRLE, M.; BARBU, M. C.; NIEMZ, P.; CARVALHO, L.; PAUL, W. **Wood-based panel technology**: an introduction for specialists. London: Brunel University Press, 2010.

IRLE, M. A.; BARBU, M. C.; REH, R.; BERGLAND, L.; ROWELL, R. M. Wood Composites. *In*: ROWELL, R. M. (ed.). Handbook of wood chemistry and wood composites. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 321-398.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. **ITTO releases latest report on world timber situation, showing surge in furniture exports**. Yokohama: ITTO, 28 set. 2023. News. Disponível em: [https://www.itto.int/news/2023/09/28/itto\\_releases\\_latest\\_report\\_on\\_world\\_timber\\_situation\\_showing\\_surge\\_in\\_furniture\\_exports/](https://www.itto.int/news/2023/09/28/itto_releases_latest_report_on_world_timber_situation_showing_surge_in_furniture_exports/). Acesso em: 5 ago. 2025.

IWAKIRI, S.; SILVA, J. C.; SILVA, J. R. M.; ALVES, C. R.; PUEHRINGER, C. A. Produção de compensados de *Pinus taeda* L. e *Pinus oocarpa* Schiede com diferentes formulações de adesivo uréia-formaldeído. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 359-370, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/8GsVxS6PmLd4BJF39kGNQvN/?lang=pt>. Acesso em: 18 out. 2025.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 2005.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; FERREIRA, E. S.; PRATA, J. G.; TRIANOSKI, R. Produção e painéis compensados estruturais com diferentes composições de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 569–576, 2012. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622012000300019>. Acesso em: 19 out. 2025.

JACOB, J.; LINSON, N.; MAVELIL-SAM, R.; MARIA, H. J.; POTHAN, L. A.; THOMAS, S.; KABDRAKHMANOVA, S.; LAROZE, D. Poly(lactic acid)/nanocellulose biocomposites for sustainable food packaging. **Cellulose**, Dordrecht, v. 31, p. 5997–6042, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10570-024-05975-w>. Acesso em: 19 out. 2025.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. **JIS a 1460**: determination of the emission of formaldehyde from building boards desiccator method. 2015.

KARRI, R. R.; NATARAJAN, T. S.; LAKKABOYANA, S. K. Recent advances in bio-based adhesives for wood composites: a review. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 112, p. 102948, 2022.

KARRI, R. R.; REDDY, K. S. N.; REDDY, K. H. A. A review on biobased adhesives from renewable resources: Materials, processes, and prospects. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 102, p. 102679, 2020.

KATSUKAKE, A. **Uma revisão sobre a resina uréia-formaldeído (RUF) empregada na produção de painéis de madeira reconstituída**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2009.

KAUR, P.; SHARMA, N.; MUNAGALA, M.; RAJKHOWA, R.; ALLARDYCE, B.; SHASTRI, Y.; AGRAWAL, R. Nanocellulose: resources, physio-chemical properties,

current uses and future applications. **Frontiers in Nanotechnology**, Lausanne, v. 3, p. 1-19, 2021. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.3389/fnano.2021.747329>. Acesso em: 19 out. 2025.

KAWALERCZYK, J.; DZIURKA, D.; MIRSKI, R.; SIUDA, J. The reduction of adhesive application in plywood manufacturing by using nanocellulose-reinforced urea-formaldehyde resin. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 138, p. 49834, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.49834>. Acesso em: 19 out. 2025.

KAWALERCZYK, J.; DZIURKA, D.; MIRSKI, R.; WALKIEWICZ, J.; BLOCH, M. Possibility of Use of NCC-Reinforced Melamine-Urea-Formaldehyde Adhesive in Plywood Manufacturing. **Drvna Industrija**, Zagreb, v. 72, p. 279-289, 2021. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.5552/drvind.2021.2029>. Acesso em: 19 out. 2025.

KAWALERCZYK, J.; DZIURKA, D.; MIRSKI, R.; SZENTNER, K. Properties of plywood produced with urea-formaldehyde adhesive modified with nanocellulose and microcellulose. **Drvna Industrija**, Zagreb, v. 71, n. 1, p. 61-67, 2020a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5552/drvind.2020.1919>. Acesso em: 19 out. 2025.

KAWALERCZYK, J.; DZIURKA, D.; MIRSKI, R.; SIUDA, J.; SZENTNER, K. The effect of nanocellulose addition to phenol-formaldehyde adhesive in water-resistant plywood manufacturing. **BioResources**, Raleigh, v. 15, n. 3, p. 5388-5401, 2020.

KHALIL, A. H. P. S.; DAVOUDPOUR, Y.; ISLAM, N.; MUSTAPHA, A.; SUDESH, K.; DUNGANI, R.; JAWAID, M. Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: a review. **Carbohydrate Polymers**, Oxford, v. 99, p. 649-665, 2014. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.08.069>. Acesso em: 19 out. 2025.

KIM, S.; KIM, H. S.; KIM, H. J.; YANG, H. Fast curing PF resin mixed with various resins and accelerators for building composite materials. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 22, n. 10, p. 2141-2146, 2008. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.007>. Acesso em: 19 out. 2025.

KLEMM, D.; HEUBLEIN, B.; FINK, H. P.; BOHN, A. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. **Angewandte Chemie International Edition**, Weinheim, v. 44, n. 22, p. 3358-3393, 2005.

KOLEVA, L.; HRISTOV, A. Graphical user interface for simulation of the mechanical properties of a new type of black locust plywood for construction. **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, Sofia, v. 56, n. 1, p. 100-106, 2021.

KREFTA, S. C.; CUNHA, A. B.; BRAND, M. A. Influência do revestimento nas propriedades de painéis compensados não-estruturais de uso exterior submetidos à câmara de intemperismo acelerado. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 50, p. e3849, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.29>. Acesso em: 19 out. 2025.

LAIVENIECE, L.; MOROZOV, A. Impact of water on rheological behavior of polyurethane glues. **Rural Sustainability Research**, Jelgava, v. 35, n. 330, p. 7-18, 2022. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1515/plua-2016-0002>. Acesso em: 19 out. 2025.

LANGE, J.; ALTMANN, N.; KELLY, C. T.; HALLEY, P. J. Understanding vitrification during cure of epoxy resins using dynamic scanning calorimetry and rheological techniques. **Polymer**, Oxford, v. 41, n. 15, p. 5949-5955, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00758-2](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00758-2). Acesso em: 19 out. 2025.

LEE, K. Y.; AITOMÄKI, Y.; BERGLUND, L. A.; OKSMAN, K.; BISMARCK, A. On the use of nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites. **Composites Science and Technology**, Oxford, v. 105, p. 15–27, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.08.032>. Acesso em: 19 out. 2025.

LEE, S. H.; DAHALI, R.; NIK HASHIM, N. H.; KUSIN, M.; MAHMUD, S.; KAMARUDIN, N.; JALIL, A.; LUBIS, M. A. Eucalyptus Plantation Worldwide, Its Hybridization and Cloning Development. *In*: NIK HASHIM, N. H. *et al.* (ed.). **The Eucalyptus Genus: an overview of its biology, cultivation and utilization**. Singapore: Springer Nature, 2023. p. 1-15. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-7919-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-99-7919-6_1). Acesso em: 19 out. 2025.

LEI, H.; ZHOU, X.; PIZZI, A.; DU, G.; XI, X. Recent Developments in Bioadhesives and Binders. **Journal of Renewable Materials**, Henderson, v. 13, n. 2, p. 199–249, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.32604/jrm.2025.02024-0048>. Acesso em: 19 out. 2025.

LENG, W.; LI, J.; CAI, Z. Synthesis and characterization of cellulose nanofibril-reinforced polyurethane foam. **Polymers**, Basel, v. 9, n. 11, p. 597, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym9110597>. Acesso em: 19 out. 2025.

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; DALLO, R.; NISGOSKI, S.; MATTOS, J. L. M.; PRATA, J. G. Nanocellulose-reinforced phenol-formaldehyde resin for plywood panel production. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 23, n. 5, p. 1-12, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100405>. Acesso em: 19 out. 2025.

LIBRETEXTS. **Infrared spectroscopy absorption table**. Chemistry LibreTexts, Davis, 2025. Disponível em: [https://chem.libretexts.org/Ancillary\\_Materials/Reference/Reference\\_Tables/Spectroscopic\\_Reference\\_Tables/Infrared\\_Spectroscopy\\_Absorption\\_Table](https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Reference/Reference_Tables/Spectroscopic_Reference_Tables/Infrared_Spectroscopy_Absorption_Table). Acesso em: 17 nov. 2025.

LIMA, M. M. S.; BORSALI, R. Rodlike cellulose microcrystals: structure, properties and applications. **Macromolecular Rapid Communications**, Weinheim, v. 25, p. 771-787, 2004.

LIMA, F.O.; SILVA, L.C.L.; CAMPOS, C.I.; CHRISTOFORO, A.L.; LAHR, F.A.R. **Pressing time influence on physical and mechanical properties of MDP panels**.

**Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 20, p. 387-393, 2018. Disponível em : <https://doi.org/10.18671/scifor.v46n119.06>. Acesso em: 19 out. 2025.

LIMA, F. O.; SILVA, L. C. L.; FAVARIM, H. R.; CAMPOS, C. I. Adição de nanopartículas em painéis engenheirados de madeira. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 8, n. 1, p. 2659-2667, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n1-173>. Acesso em: 19 out. 2025.

LIU, C.; WANG, H.; CUI, Z.; HE, X.; WANG, X.; ZENG, X.; MA, H. Optimization of extraction and isolation for 11S and 7S globulins of soybean seed storage protein. **Food Chemistry**, Oxford, v. 102, n. 4, p. 1310-1316, 2007.

LIU, Y.; GUAN, M. Selected physical, mechanical, and insulation properties of carbon fiber fabric-reinforced composite plywood for carriage floors. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 77, n. 6, p. 995-1007, 2019.

LIU, B.; ZHOU, Y.; ESSAWY, H.; CHEN, Q.; LIANG, J.; ZHOU, X.; ZHANG, J.; DU, G. Formaldehyde-free tannin-based adhesive with epoxy as hardener for plywood. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 24, p. 1-13, 2022. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/485/48575019033/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

LU, X.; PIZZI, A. Interior MDI/pine tannin plywood adhesives without formaldehyde. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v. 56, n. 1, p. 78, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s001070050267>. Acesso em: 19 out. 2025.

LUOSTARINEN, K. Birch as sawn timber and in mechanical further processing in finland: a literature study. **The Finnish Society of Forest Science**, Helsinki, v. 59, n. 3, p. 1-40, 2000. Disponível em: <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/508739/Luostarinen.pdf>. Acesso em: 19 out. 2025.

LUOSTARINEN, K.; KORKALO, P.; HEISKANEN, V. Effect of moisture content on strength properties of wood composites. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 3, p. 55-60, 2000.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. 2. ed. San Francisco: Miller Freeman, 1993. 689 p.

MAGALHÃES, W.L.E.; CLARO, F.C.; MATOS, M.; LENGOWSKI, E.C. **Produção de nanofibrilas de celulose por desfibrilação mecânica em moinho coloidal**. Colombo: Embrapa Florestas, 2017. 5 p.

MARAKALALA, B. I.; NHETA, W.; BALOYI, N. P. Structural evolution of coal fines to graphite produced by metal-assisted microwave method. In: JOHANNESBURG INT'L CONFERENCE ON CHEMICAL, BIOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 39., 2023, Johannesburg. **Anais [...]**. Johannesburg, 2023.

MARKETGROWTHREPORTS. **Wood based panel market size e insights report: relatório de mercado**. Pune: MarketGrowthReports, 2025. Disponível em:

<https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/wood-based-panel-market-106881>. Acesso em: 10 set. 2025.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. **Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

MAULANA, S.; WIBOWO, E. S.; MARDAWATI, E.; ISWANTO, A. H.; PAPADOPOULOS, A.; LUBIS, M. A. R. Eco-friendly and high-performance bio-polyurethane adhesives from vegetable oils: a review. **Polymers**, Basel, v. 16, n. 11, p. 1613, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16111613>. Acesso em: 19 out. 2025.

MESSIER, C.; BAUHUS, J.; SOUSA-SILVA, R. For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests. **Conservation Letters**, Washington, v. 14, n. 1, p. e12829, 2021.

MONDRAGON, G.; PEÑA-RODRIGUEZ, C.; GONZÁLEZ, A.; ECEIZA, A.; ARBELAIZ, A. Bionanocomposites based on gelatin matrix and nanocelulose. **European Polymer Journal**, Oxford, v. 62, p. 1-9, 2015.

MOON, R. J.; MARTINI, A.; NAIRN, J.; SIMONSEN, J.; YOUNGBLOOD, J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. **Chemical Society Reviews**, Cambridge, v. 40, n. 7, p. 3941-3994, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c0cs00108b>. Acesso em: 19 out. 2025.

MIAO, C.; HAMAD, W. Y. Cellulose reinforced polymer composites and nanocomposites: a critical review. **Cellulose**, Dordrecht, v. 20, n. 5, p. 2221-2262, out. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0007-3>. Acesso em: 19 out. 2025.

MISSOUM, K.; BELGACEM, M. N.; BRAS, J. Nanofibrillated cellulose surface modification: a review. **Materials**, Basel, v. 6, n. 5, p. 1745-1766, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma6051745>. Acesso em: 19 out. 2025.

NAKANO, K.; ANDO, K.; TAKIGAWA, M.; HATTORI, N. Life cycle assessment of wood-based boards produced in Japan and impact of formaldehyde emissions during the use stage. **International Journal of Life Cycle Assessment**, Berlin, v. 23, n. 4, p. 957-969, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1343-6>. Acesso em: 19 out. 2025.

NELSON, P. M.; NASCIMENTO, E. M.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E.; NETO, S. C.; AZEVEDO, E. C. Caracterização física e térmica de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona associado com partículas de bambu. **Polímeros**, São Carlos, v. 23, n. 2, p. 201-205, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/qdLxjK4LzjNcz5r9rzZXXkC/>. Acesso em: 29 nov. 2025.

NETZSCH. **Resina de fenol-formaldeído – fórmula estrutural**. Selb: Analyzing and Testing, 2025. Disponível em: <https://analyzing-testing.netzsch.com/pt-BR/polymers-netzsch-com/thermosets/resina-de-pf-fenol-formaldeido>. Acesso em: 29 nov. 2025.

NISHIYAMA, Y.; LANGAN, P.; CHANZY, H. Crystal structure and hydrogen-bonding system in cellulose I $\beta$  from synchrotron X-ray and neutron fiber diffraction. **Journal of the American Chemical Society**, Washington, v. 124, n. 31, p. 9074-9082, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ja0257319>. Acesso em: 19 out. 2025.

NORDI, S. S.; NOOR, E. E. M.; KOK, C. K.; JULKAPLI, N. M.; BAIG, M. F. Phase, chemical, thermal, and morphological analyses of thermoplastic polyurethane (TPU) nanocomposites reinforced with jute cellulose nanofibers (NFCs). **Polymers**, Basel, v. 17, n. 7, p. 899, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym17070899>. Acesso em: 19 out. 2025.

OH, Y.; KIM, K. Evaluation of melamine-modified urea-formaldehyde resin for plywood flooring adhesive application. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 199-203, 2011.

PÄÄKKÖ, M.; ANKERFORS, M.; KOSONEN, H.; NYKÄNEN, A.; AHOLA, S.; ÖSTERBERG, M.; RUOKOLAINEN, J.; LAINE, J.; LARSSON, P. T.; IKKALA, O.; LINDSTRÖM, T. Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels. **Biomacromolecules**, Washington, v. 8, n. 6, p. 1934-1941, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/bm061215p>. Acesso em: 19 out. 2025.

PANTHAPULAKKAL, S.; SAIN, M. Preparation and characterization of cellulose nanofibril films from wood fibre and their thermoplastic polycarbonate composites. **International Journal of Polymer Science**, London, v. 2012, art. 381342, p. 1-6, 2012.

POPOVSKA, V. J.; ILIEV, B.; ZLATESKI, G. Impact of veneer layouts on plywood tensile strength. **Drvna Industrija**, Zagreb, v. 68, n. 2, p. 153-161, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5552/drind.2017.1634>. Acesso em: 10 abr. 2025.

POPOVSKA, S.; IVANOVA, T.; MITREV, S.; ATANASOVA-PACEMSKA, T. Tensile properties of beech plywood with different cross-section configurations. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 134, p. 231-237, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.109>. Acesso em: 19 out. 2025.

PRAMREITER, M.; NENNING, T.; HUBER, C.; KROMOSER, B.; MAYENCOURT, P.; KONNERTH, J. A review of the resource efficiency and mechanical performance of commercial wood-based building materials. **Sustainable Materials and Technologies**, Amsterdam, v. 38, p. e00755, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00755>. Acesso em: 16 maio 2025.

PURUSATAMA, B. D.; WIBOWO, E. S.; SANTOSO, A.; KIM, N. H.; ISWANTO, A. H.; LUBIS, M. A. R. Exploring bonding and interfacial adhesion properties of normal and reaction wood in wood-based composites: a review. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 140, p. 104008, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2025.104008>. Acesso em: 9 jul. 2025.

RAMBABU, N.; PANTHAPULAKKAL, S.; SAIN, M.; DALAI, A. K. Production of nanocellulose fibers from pinecone biomass: evaluation and optimization of chemical

and mechanical treatment conditions on mechanical properties of nanocellulose films. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 83, p. 746-754, 2016.

RANJAN, M.; NANDANWAR, A.; KUSHWAHA, P. K. Comparative study on physical-mechanical properties of plywood produced from *Eucalyptus grandis* and *Populus deltoides* veneers. **Wood Research**, Bratislava, v. 67, n. 6, p. 1074-1080, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.6.10741080>. Acesso em: 19 out. 2025.

REIXACH, R.; CLARAMUNT, J.; CHAMORRO, M. À.; LLORENS, J.; PARETA, M. M.; TARRÉS, Q.; MUTJÉ, P.; DELGADO-AGUILAR, M. On the path to a new generation of cement-based composites through the use of lignocellulosic micro/nanofibers. **Materials**, Basel, v. 12, n. 24, p. 4052, 2019.

RIBEIRO, T. S. **Produção de painéis compensados de *Pinus taeda* com resina ureia-formaldeído utilizando diferentes extensores**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008. Disponível em: <https://rima.ufrrj.br/jspui/handle/20.500.14407/2766>. Acesso em: 29 nov. 2025.

SALAS, C.; NYPELÖ, T.; RODRIGUEZ-ABREU, C.; CARRILLO, C.; ROJAS, O. J. Nanocellulose properties and applications in colloids and interfaces. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, Oxford, v. 19, n. 5, p. 383-396, 2014.

STAMATO, G. C. **Resistência ao embutimento da madeira compensada**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-16032018-163457/publico/Dissert\\_Stamato\\_GuilhermeC.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-16032018-163457/publico/Dissert_Stamato_GuilhermeC.pdf). Acesso em: 29 nov. 2025.

STANTURF, J. A.; VANCE, E. D.; FOX, T. R.; KIRST, M. *Eucalyptus* beyond its native range: environmental issues in exotic bioenergy plantations. **International Journal of Forestry Research**, London, v. 2013, art. 463030, p. 1-5, 2013.

RAMANTSWANA, M.; GUERRA, S. P. S.; ERSSON, B. T. Advances in the mechanization of regenerating plantation forests: a review. **Current Forestry Reports**, Cham, v. 6, n. 3, p. 143-158, 2020.

ROCHA, R. J.; LIMA, J. E. S.; GOMES, S. R.; IHA, K.; ROCCO, J. A. F. F. Síntese de poliuretanos modificados por óleo de mamona empregados em materiais energéticos. **Química Nova**, São Paulo, v. 36, n. 6, p. 793-799, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/RnXg4TkFPnfBYRQfMNLcbg/>. Acesso em: 20 ago. 2025.

RODRIGUES, G. S. S. C.; ROSS, J. L. S.; TEIXEIRA, G. A.; SANTIAGO, O. R. P. L.; FRANCO, C. **Eucalipto no Brasil: expansão geográfica e impactos ambientais**. Ed. rev. Uberlândia, MG: Composer, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/42063/1/LIVRO%20EUCALIPTO%20REVISADO%202024.pdf>. Acesso em: 19 set. 2025.

ROJAS, H.; ALLAIS, M.; ZHOU, Q.; BERGLUND, L. A. Wood cellulose biocomposites with fibrous structures at micro- and nanoscale. **Composites Science and Technology**, Oxford, v. 71, n. 3, p. 382-387, 2011.

SANTOS, D.; OLIVEIRA, L.; GOVEIA, D.; FERNANDES, A.; BOTERO, W. Evaluation of nanocellulose films enriched with humic substances for remediation of environments contaminated by Cd and Pb. **Discover Environment**, Cham, v. 3, p. 1-19, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00330-7>. Acesso em: 19 out. 2025.

SEMBIRING, N.; NAPITUPULU, H. L.; SIPAHUTAR, A. I.; SEMBIRING, M. T. A review of sustainable replanting Eucalyptus: higher sustainable productivity. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Bristol, v. 935, p. 1-10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/935/1/012068>.

SILVA, L. C. L.; LIMA, F. O.; CAMPOS, C. I.; FAVARIM, H. R. Influência da adição de nanopartículas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CuO nas propriedades físicas de painéis particulados de madeira. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 5, p. 52535-52543, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-588>. Acesso em: 19 out. 2025.

SILVA, G. C.; LELIS, R. C. C.; OLIVEIRA, G. de L.; SILVA, B. C.; LOSSANO, W. C. da; ABREU, H. Propriedades de adesivo aplicado em painéis a partir da substituição por lignossulfonato do processo sulfito. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 322-335, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509818414>. Acesso em: 19 out. 2025.

TINGAUT, P.; ZIMMERMANN, T.; LOPEZ-SUEVOS, F. Cellulose nanofibrils as reinforcing elements for polymer nanocomposites. **Composites Science and Technology**, Oxford, v. 127, p. 41-48, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.02.013>. Acesso em: 19 out. 2025.

TOGAY, A.; ERGIN, E. Determination of some physical attributes for wooden construction elements strengthened with woven wire fiberglass. **BioResources**, Raleigh, v. 9, n. 3, p. 3883-3900, 2014.

TOHMURA, S.; MIYAMOTO, K.; INOUE, A. Measurement of aldehyde and VOC emissions from plywood of various formaldehyde emission grades. **Mokuzai Gakkaishi**, Tokyo, v. 51, n. 5, p. 340-344, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.2488/jwrs.51.340>. Acesso em: 19 out. 2025.

TSCHURTSCHENTHALER, G. **Die Synthese eines Cellulose-Nanofibrillen-verstärkten Harnstoff-Formaldehyd-Leimes**. 2012. 57 f. Masterarbeit (Master in Holztechnologie und Management) – Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik, Universität für Bodenkultur Wien, Wien, 2012. Disponível em: <http://permalink.obvsg.at/bok/AC09373285>. Acesso em: 19 out. 2025.

VILAR, W. D. Química e tecnologia dos poliuretanos. Camaçari, BA: Grupo Pronor, 1993.

VINEETH, S. K.; GADHAVE, R. V.; GADEKAR, P. T. Nanocellulose applications in wood adhesives: a review. **Open Journal of Polymer Chemistry**, Irvine, v. 9, n. 4, p. 63-75, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ojpchem.2019.94006>. Acesso em: 19 out. 2025.

**WANG, X.** Fiber-reinforced polymer composites in wooden structures: performance and durability. **Construction and Building Materials**, Oxford, v. 287, p. 125028, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125028>. Acesso em: 19 out. 2025.

WANG, X.; GUO, W.; ZHONG, H.; WANG, P.; CAO, J. Evaluation of mechanical properties of reinforced poplar laminated veneer lumber. **BioResources**, Raleigh, v. 10, n. 4, p. 7155-7164, 2015.

WEI, P.; WANG, B. J.; ZHOU, D.; DAI, C.; WANG, Q.; HUANG, S. Mechanical properties of poplar laminated veneer lumber modified by carbon fiber reinforced polymer. **BioResources**, Raleigh, v. 8, n. 4, p. 4883-4898, 2013.

WEN, Y.; ZHOU, X.; YU, S.; ZHU, H. The predicament and countermeasures of development of global Eucalyptus plantations. **Guangxi Sciences**, Nanning, v. 25, n. 2, p. 107-116, 2018.

WIBOWO, E.; LUBIS, M. A. R.; PARK, B. D. In-situ modification of low molar ratio urea-formaldehyde resins with cellulose nanofibrils for plywood. **Journal of Adhesion Science and Technology**, Abingdon, v. 35, n. 16, p. 1-15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1890370>. Acesso em: 19 out. 2025.

WOOD FOREST EXPERTS. **O mercado brasileiro de painéis de madeira**. 2023. Disponível em: <https://www.woodforestexperts.com.br/post/o-mercado-brasileiro-de-pain%C3%A9is-de-madeira>. Acesso em: 20 nov. 2025.

XIAO, G.; LIANG, J.; LI, D.; TU, Y.; ZHANG, B.; GONG, F.; GU, W.; TANG, M.; DING, X.; WU, Z. Fully bio-based adhesive from tannin and sucrose for plywood manufacturing with high performances. **Materials**, Basel, v. 15, n. 24, p. 8725, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15248725>. Acesso em: 19 out. 2025.

YANG, J. L.; WAUGH, G. Growth stress, its measurement and effects. **Australian Forestry**, Abingdon, v. 64, n. 2, p. 127-135, 2001.

YOUNESI-KORDKHEILI, H. Maleated lignin coreaction with phenol-formaldehyde resins for improved wood adhesives performance. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 113, p. 103080, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103080>. Acesso em: 19 out. 2025.

YU, Y.; QIU, X.; LI, C.; BAO, D.; CHANG, J. Performance and characterization of phenol-formaldehyde resin with crude bio-oil by model compound method. **PLoS One**, San Francisco, v. 18, n. 1, p. e0271478, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271478>. Acesso em: 19 out. 2025.

ZHANG, H.; ZHANG, J.; SONG, S.; WU, G.; PU, J. Modified nanocrystalline cellulose from two kinds of modifiers used for improving formaldehyde emission and bonding strength of urea-formaldehyde resin adhesive. **BioResources**, Raleigh, v. 6, n. 4, p. 4430-4438, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.6.4.4430-4438>.

Acesso em: 19 out. 2025.

ZHANG, H.; SHE, Y.; SONG, S. P.; PU, J. W. Modified nanocrystalline cellulose used for improving formaldehyde emission and bonding strength of urea formaldehyde resin adhesive. **Key Engineering Materials**, Baech, v. 562-565, p. 846-851, 2013.

Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.562-565.846>. Acesso em: 19 out. 2025.

ZHU, Z.; ZHANG, E.; TU, Y.; YE, M.; CHEN, N. Um adesivo ecológico para madeira composto por proteína de soja e epóxi à base de cardanol para compósitos de madeira. **Polymers**, Basel, v. 14, n. 14, p. 2831, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14142831>. Acesso em: 19 out. 2025.

**DADOS CURRICULARES**

<b>IDENTIFICAÇÃO</b>	
	Luana Cristal Lirya Silva 16/01/1995
<b>Nacionalidade</b>	brasileira
<b>Nome em citações bibliográficas:</b>	Silva, Luana Cristal Lirya Silva, L.C.L. Lirya Silva, Luana Cristal Lirya Silva, L.C.
<b>Currículo Lattes</b>	<a href="https://lattes.cnpq.br/3060237681557896">https://lattes.cnpq.br/3060237681557896</a>
<b>ORCID</b>	<a href="https://orcid.org/0000-0002-3336-181X">https://orcid.org/0000-0002-3336-181X</a>
<b>FORMAÇÃO ACADÊMICA</b>	
<b>2014/20218</b>	Graduação (Engenharia Industrial Madeireira). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.
<b>2019/2021</b>	Mestrado (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.
<b>2021/2026</b>	Doutorado (Engenharia) Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.
<b>PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	
<p>LIRYA SILVA, L.C.; LIMA, F.O. ; MONTEIRO, S.N. ; AZEVEDO, A.R.G. ; CHRISTOFORO, A.L. ; FERREIRA, B.S. ; GOVEIA, D. ; DE CAMPOS, C.I. . The use of nano-structured cellulose to improve plywood: A review. Journal of Materials Research and Technology-JMR&amp;T, v. 35, p. 392-401, 2025.</p> <p>SILVA, LUANA CRISTAL LIRYA; MONTEIRO FILHO, SANDRO DE SOUZA ; LIMA, FELIPE OLIVEIRA ; CAMPOS, CRISTIANE INÁCIO DE . Mechanical Performance of Plywood Bonded with Castor Oil-based Polyurethane Resin Enhanced by Nanocellulose. Materials Research-Ibero-american Journal of Materials, v. 28, p. 94, 2025.</p> <p>SILVA, LUANA CRISTAL LIRYA; LIMA, FELIPE OLIVEIRA ; DE ARAUJO, VICTOR ALMEIDA ; DOS SANTOS, HERISSON FERREIRA ; LAHR, FRANCISCO ANTONIO ROCCO ; CHRISTOFORO, ANDRÉ LUIS ; FAVARIM, HIGOR ROGÉRIO ; DE CAMPOS, CRISTIANE INÁCIO . Influence of Pressing</p>	

Temperatures on Physical-Mechanical Properties of Wood Particleboards Made with Urea-Formaldehyde Adhesive Containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CuO Nanoparticles. *Polymers*, v. 16, p. 1652, 2024.

LIMA, FELIPE OLIVEIRA ; LIRYA SILVA, LUANA CRISTAL ; MAIA, ROSANGELA ALMEIDA ; OLIVEIRA, ILIANE RODRIGUES DE ; OLIVEIRA, CLÁUDIA RODRIGUES DE ; FAVARIM, HIGOR ROGÉRIO ; CAMPOS, CRISTIANE INÁCIO DE . ZnO nanoparticle: production and use for particleboard improvement. *CONCILIUM (ENGLISH LANGUAGE EDITION)*, v. 23, p. 420-429, 2023.

LIMA, FELIPE OLIVEIRA ; SILVA, LUANA CRISTAL LIRYA ; FAVARIM, HIGOR ROGÉRIO ; DE CAMPOS, CRISTIANE INÁCIO . Adição de nanopartículas em painéis engenheirados de madeira / Addition of nanoparticles in engineered wood panels. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, p. 2659-2667, 2022.

RODRIGUES DE OLIVEIRA, CLÁUDIA ; VENTORIM, GUSTAVO ; RODRIGUES DE OLIVEIRA, ILIANE ; FERRAZ, ANA PAULA ALMEIDA ; SILVA, LUANA CRISTAL LIRYA ; NUNES DOS SANTOS, ANDRÉ LUIS . Evaluation of pulp and paper properties produced from two new bleaching sequences. *Nordic Pulp & Paper Research Journal JCR*, v. 37, p. 232-237, 2022.

LIMA, FELIPE O. ; SILVA, LUANA CRISTAL L. ; FERREIRA, BRUNO S. ; MORAIS, CÉSAR AUGUSTO G. DE ; BERTOLINI, MARÍLIA DA S. ; BARREIROS, RICARDO M. ; AZAMBUJA, MAXIMILIANO DOS A. ; CARASCHI, JOSÉ CLAUDIO ; FAVARIM, HIGOR R. ; CAMPOS, CRISTIANE I. . Influence of the addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles and the duration of pressing on the physical properties of OSB panels. *BioResources JCR*, v. 17, p. 3014-3024, 2022.

SILVA, L. C. L.; LIMA, F. O. ; CAMPOS, C. I. ; FAVARIM, H. R. . Influência da adição de nanopartículas de AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CUO nas propriedades físicas de painéis particulados de madeira. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, p. 52535-52543, 2021.

## PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES

### Bancas de trabalhos de conclusão

LIRYA SILVA, L. C.; KASSAI, J. R. Participação em banca de Gabriela Coltre de Sousa Quadrado. **Impacto da metodologia Lean Production na qualidade e lead time do produto em uma indústria de vestuário**. 2026. Monografia (MBA em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, 2026.

LIRYA SILVA, L.C.; FRANCISCHINI, P. G. Participação em banca de Graziela Calza Pandolfo. **Implementação de metodologia lean manufacturing em célula de produção de pastas pigmentárias de uma fábrica de tintas**. 2026. Monografia (MBA em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, 2026.

SIQUEIRA, J. A. L.; SILVA, L C L. Participação em banca de Rodrigo Luko de Alencar. **Aplicação dos Princípios Lean na Gestão da Segurança do Trabalho na Construção Civil**. 2025. Monografia (MBA em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, 2025.

NETTO, C. A. A.; SILVA, L C L. Participação em banca de Wilian Roberto Mantoanelli. **Um Olhar sobre Práticas de Gestão de Equipes na Construção Civil**. 2025. Monografia (MBA em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, 2025.

LIMA, F. O.; LIRYA SILVA, L. C. Participação em banca de Daniel Nogueira, Fabiana Regina Funes Della Sanita e Tiago Araújo dos Santos. **A música no aprendizado: um recurso motivacional e pedagógico para o desenvolvimento integral no ensino fundamental**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Fundação Universidade Virtual do Estado de São Paulo (UNIVESP), 2021.

LIMA, F. O.; LIRYA SILVA, L. C. Participação em banca de Andréa Merotti de Carvalho Camuc, Cristiano Aparecido Moreira e Neila Brígida Soares da Silva Freitas. **A importância das habilidades socioemocionais para o desenvolvimento pleno do educando no retorno às aulas presenciais**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Fundação Universidade Virtual do Estado de São Paulo (UNIVESP), 2021.

LIMA, F. O.; LIRYA SILVA, L. C. Participação em banca de Carolaine Teixeira Milla, Divina Maria Oliveira e Selma Rodrigues de Oliveira Lisboa. **Musicalização na educação infantil**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Fundação Universidade Virtual do Estado de São Paulo (UNIVESP), 2021.

### Orientações

COLTRE DE SOUSA QUADRADO, G. **Impacto da metodologia Lean Production na qualidade e lead time do produto em uma indústria de vestuário**. 2026. Orientador: Nome Completo do Orientador. 2026. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, 2026.

CALZA PANDOLFO, G. **Implementação de metodologia lean manufacturing em célula de produção de pastas pigmentárias de uma fábrica de tintas**. 2026. Orientador: Nome Completo do Orientador. 2026. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, 2026.

LUKO DE ALENCAR, R. **Aplicação dos Princípios Lean na Gestão da Segurança do Trabalho na Construção Civil**. 2025. Orientador: Nome Completo do Orientador. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, 2025.

MANTOANELLI, W. R. **Um Olhar sobre Práticas de Gestão de Equipes na Construção Civil**. 2025. Orientador: Nome Completo do Orientador. 2025.

Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Engenharia de Produção) -  
Universidade de São Paulo, 2025.

### **PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS**

VIII WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO, 8., 2024. Resistência e rigidez de painéis compensados produzidos com 5% de nanocelulose em substituição ao adesivo fenólico. 2024. (Outra).

VII WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO, 7., 2023. Produção de painéis compensados com adição de nanocelulose: uma análise preliminar. 2023. (Congresso).

VI WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO, 6., 2021. O uso de nanocelulose para redução da emissão de formaldeído em painéis de madeira. 2021. (Congresso).