



**HUDSON VENÂNCIO SILVA GARCIA**

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE NANOFIBRILAS DE  
CELULOSE EM SUBSTITUIÇÃO AO ADESIVO UREIA-  
FORMALDEÍDO NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS  
AGLOMERADOS**

**LAVRAS – MG  
2021**

**HUDSON VENÂNCIO SILVA GARCIA**

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE NANOFIBRILAS DE CELULOSE EM  
SUBSTITUIÇÃO AO ADESIVO UREIA-FORMALDEÍDO NA PRODUÇÃO DE  
PAINÉIS AGLOMERADOS**

**CELLULOSE NANOFIBRILS POTENTIAL USE TO THE REPLACEMENT OF  
UREA-FORMALDEHYDE ADHESIVE IN THE PRODUCTION OF  
PARTICLEBOARDS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

Dr. José Benedito Guimarães Júnior  
(Orientador, DEG/ESCOLAENG/UFLA)

Dr. Sidney Araújo Cordeiro  
(Coorientador, DCF/FCA/UFVJM)

Dr. Thiago de Paula Protásio  
(Coorientador, PBS/UFRA)

Dr.<sup>a</sup> Maria Alice Martins  
(Coorientadora, Embrapa – PPGBIOMAT UFLA)

**LAVRAS – MG  
2021**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Garcia, Hudson Venâncio Silva.

Potencial de utilização de nanofibrilas de celulose em  
substituição ao adesivo ureia-formaldeído na produção de painéis  
aglomerados / Hudson Venâncio Silva Garcia. - 2021.

70 p. : il.

Orientador(a): José Benedito Guimarães Junior.

Coorientador(a): Sidney Araújo Cordeiro, Thiago de Paula  
Protásio, Maria Alice Martins.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Adesivo. 2. Nanocelulose. 3. Nanotecnologia. I. Guimarães  
Junior, José Benedito. II. Cordeiro, Sidney Araújo. III. Protásio,  
Thiago de Paula. IV. Martins, Maria Alice. V. Título.

**HUDSON VENÂNCIO SILVA GARCIA**

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE NANOFIBRILAS DE CELULOSE EM  
SUBSTITUIÇÃO AO ADESIVO UREIA-FORMALDEÍDO NA PRODUÇÃO DE  
PAINÉIS AGLOMERADOS**

**CELLULOSE NANOFIBRILS POTENTIAL USE TO THE REPLACEMENT OF  
UREA-FORMALDEHYDE ADHESIVE IN THE PRODUCTION OF  
PARTICLEBOARDS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA, em 30 de abril de 2021.

Dr. José Benedito Guimarães Júnior – UFLA.

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein – UFLA.

Dr.<sup>a</sup> Flávia Maria Silva Brito – ESALQ/USP.

Dr. José Benedito Guimarães Júnior  
(Orientador, DEG/ESCOLAENG/UFLA)

Dr. Sidney Araújo Cordeiro  
(Coorientador, DCF/FCA/UFVJM)

Dr. Thiago de Paula Protásio  
(Coorientador, PBS/UFRA)

Dr.<sup>a</sup> Maria Alice Martins  
(Coorientadora, Embrapa – PPGBIOMAT UFLA)

**LAVRAS – MG  
2021**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais essa conquista e que ele continue iluminando meus caminhos para que novos desafios sejam alcançados.

Aos meus pais, irmãos e amigos por todo amor, carinho, compreensão e motivação diante das adversidades.

À Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade oferecida de realizar o mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos os amigos e professores do Programa Pós-Graduação de Engenharia de Biomateriais (PPGBIOMAT – UFLA), pela convivência e amizade.

Ao Prof. Dr. José Benedito Guimarães Júnior, pela amizade, humildade, orientação e ensinamentos nas etapas deste projeto.

Aos membros da banca de defesa, pelas colaborações, sugestões e avaliação deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório Arley e Lohan e os funcionários da UEPAM que, de alguma forma, me ajudaram tanto no desenvolvimento profissional quanto no pessoal.

Ao Laboratório de Fitopatologia, pelo apoio concedido durante a realização das análises por microscópio eletrônico de varredura (MEV).

À Central de Análises e Prospecção Química da Universidade Federal de Lavras, e a Finep, FAPEMIG, CNPq e Capes, pelo fornecimento dos equipamentos e suporte técnico para experimentos envolvendo análises térmicas.

Àqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho com bons conselhos e incentivo.

Obrigado!

## RESUMO

É crescente o uso da nanotecnologia no desenvolvimento de materiais sustentáveis, renováveis e biodegradáveis visando diferentes aplicações industriais. Neste sentido, a nanocelulose vem despertando o interesse devido às características excepcionais em escala nanométrica. Este nanomaterial abundante e produzido a partir da biomassa lignocelulósica, mostra-se como uma alternativa promissora na busca de substituir os adesivos sintéticos derivados de fontes não-renováveis. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito da substituição (20, 40, 60 e 80%) do adesivo ureia-formadeído (UF) por nanofibrilas de celulose (NFC), além de um tratamento controle, composto por painéis de partículas encoladas com adesivo a base de UF. A NFC na concentração de 2,0 % em peso foi obtida via desfibrilação mecânica. Utilizou-se 10 % de adesivo UF, 2 % de suspensão de NFC e 1 % de parafina. Os painéis foram produzidos com uma densidade nominal de  $0,79 \text{ g cm}^{-3}$  e dimensões de  $15 \times 15 \times 1 \text{ cm}$  (comprimento, largura e espessura, respectivamente). Foram adotadas três repetições. Foi utilizada uma prensagem hidráulica a frio a 1 MPa por 10 minutos, em seguida, prensagem a quente de 4,0 MPa a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 15 minutos. Foram avaliadas as propriedades de densidade aparente, razão de compactação, teor de umidade, absorção de água e inchamento em espessura (2 e 24 horas), resistência a flexão estática módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) e tração perpendicular (TP). Com base nos resultados, pode-se concluir que à medida que aumentou a proporção de NFC nos painéis ocorreu maior absorção de água e inchamento em espessura, bem como redução nas propriedades mecânicas (MOR, MOE e TP). As propriedades densidade aparente, teor de umidade, inchamento em espessura, flexão estática e tração perpendicular atenderam os requisitos mínimos determinados pela norma ANSI A208.1 (2009). Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam a substituição de até 31% das nanofibrilas de celulose na produção de painéis aglomerados.

**Palavras-chave:** Adesivo. Nanocelulose, Nanotecnologia. Painéis aglomerados.

## ABSTRACT

The use of nanotechnology in the development of sustainable, renewable and biodegradable materials for different industrial applications is increasing. In this sense, nanocellulose has been arousing interest due to its exceptional characteristics at the nanoscale. This abundant nanomaterial, produced from lignocellulosic biomass, is a promising alternative in the quest to replace synthetic adhesives derived from non-renewable sources. In this context, the objective of this research was to evaluate the effect of replacing (20, 40, 60 and 80%) of the urea-formaldehyde (UF) adhesive by cellulose nanofibrils (NFC), in addition to a control treatment, consisting of particle boards glued with UF-based adhesive. NFC at a concentration of 2.0% by weight was obtained via mechanical defibrillation. 10% UF adhesive, 2% NFC suspension and 1% paraffin were used. The panels were produced with a nominal density of  $0.79 \text{ g cm}^{-3}$  and dimensions of 15 x 15 x 1 cm (length, width and thickness, respectively). Three repetitions were adopted. Hydraulic cold pressing at 1 MPa for 10 minutes was used, followed by hot pressing of 4.0 MPa at 150 °C for 15 minutes. The properties of bulk density, compaction ratio, moisture content, water absorption and swelling in thickness (2 and 24 hours), resistance to static bending modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) and perpendicular traction were evaluated (TP). Based on the results, it can be concluded that as the proportion of NFC in the panels increased, there was greater water absorption and swelling in thickness, as well as a reduction in mechanical properties (MOR, MOE and TP). The apparent density, moisture content, swelling in thickness, static bending and perpendicular traction properties met the minimum requirements determined by the ANSI A208.1 (2009) standard. The results obtained in this research indicate the replacement of up to 31% of cellulose nanofibrils in the production of particleboard.

**Keywords:** Adhesive. Nanocellulose. Nanotechnology. Particleboards.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

Figura 1 – Moinho *Masscolloider Masuko (grinder)*. ..... 20

### SEGUNDA PARTE: ARTIGO

Figura 1 – Caracterização morfológica das partículas de *Pinus oocarpa*. ..... 46

Figura 2 – Caracterização química das partículas de *Pinus oocarpa*. ..... 47

Figura 3 – Comportamento térmico dos diferentes tratamentos avaliados. .... 51

Figura 4 – Micrografia dos painéis produzidos com adesivo UF e NFC. .... 53

Figura 5 – Absorção de água de painéis aglomerados para os diferentes tratamentos. .... 55

Figura 6 – Inchamento em espessura dos painéis aglomerados produzidos com NFC. .... 57

Figura 7 – Propriedades à flexão estática (MOE e MOR) dos painéis aglomerados produzidos com NFC. .... 58

Figura 8 – Tração perpendicular dos painéis aglomerados produzidos com NFC. .... 60



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Plano experimental dos painéis aglomerados.....	44
Tabela 2 – Determinação das propriedades físicas e mecânicas. ....	44
Tabela 3 – Valores médios de teor de sólidos, pH, viscosidade e gel time dos adesivos. ....	49
Tabela 4 – Parâmetros característicos de cada estágio de degradação térmica dos diferentes tratamentos. ....	51
Tabela 5 – Valores médios de densidade aparente, razão de compactação e teor de umidade dos painéis aglomerados. ....	53

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE .....</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Painéis de madeira .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Painéis aglomerados.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Adesivo ureia-formaldeído.....</b>	<b>15</b>
<b>2.4 Nanotecnologia .....</b>	<b>17</b>
<b>2.5 Pré-tratamento das fibras e processo para geração de nanocelulose .....</b>	<b>18</b>
<b>2.6 Processo mecânico de desfibração .....</b>	<b>19</b>
<b>2.7 Nanofibrilas de celulose (NFC).....</b>	<b>20</b>
<b>2.8 Nanocelulose em adesivo para painéis de madeira .....</b>	<b>22</b>
<b>3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>24</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>25</b>
<b>SEGUNDA PARTE: ARTIGO.....</b>	<b>38</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>38</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>39</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
<b>2.1 Materiais lignocelulósicos e suas características.....</b>	<b>41</b>
<b>2.2 Caracterização morfológica das nanofibrilas de celulose.....</b>	<b>43</b>
<b>2.3 Preparação e caracterização dos adesivos (UF-NFC).....</b>	<b>43</b>
<b>2.4 Produção e caracterização dos painéis aglomerados .....</b>	<b>44</b>
<b>2.5 Caracterização microestrutural (MEV).....</b>	<b>45</b>
<b>2.6 Análise estatística .....</b>	<b>45</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>3.1 Caracterização do material lignocelulósico.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2 Caracterização morfológica das partículas.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3 Caracterização química das partículas .....</b>	<b>47</b>
<b>3.4 Caracterização dos adesivos com adição de NFC .....</b>	<b>48</b>
<b>3.5 Comportamento térmico dos adesivos.....</b>	<b>50</b>
<b>3.6 Caracterização dos painéis .....</b>	<b>52</b>
<b>3.6.1 Avaliação da interface madeira-adesivo (MEV) .....</b>	<b>52</b>
<b>3.6.2 Propriedades físicas .....</b>	<b>53</b>
<b>3.6.3 Propriedades mecânicas.....</b>	<b>57</b>
<b>4 CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

A nanotecnologia vem revolucionando a produção e o desenvolvimento de materiais renováveis em vários segmentos da indústria e em instituições de pesquisas, uma vez que os aspectos sociais, econômicos e ambientais ganham importância na busca de substituir a matéria-prima de base petroquímica por polímeros de base biológica (WEBER; IWAKIRI, 2015; LENGOWSKI et al., 2019a). Polímeros de base biológica são materiais derivados da biomassa vegetal, seja resíduos agroindustriais ou florestais. Dentre eles, destaca-se a celulose, que é um dos polímeros biodegradáveis mais abundantes no planeta, sendo o principal componente estrutural dos vegetais (ISOGAI; ZHOU, 2019; LOPES, 2019).

A utilização da celulose tem conquistado espaço nos meios industriais, principalmente, por suas características, tais como: renovabilidade, biocompatibilidade, biodegradabilidade, baixo custo, baixa densidade, alta área de superfície e alta resistência (BOUFI; KADDAMI; DUFRESNE, 2014; KHALIL et al., 2014; KANG et al., 2017; SOLALA; IGLESIAS; PERESIN, 2020). Neste sentido, a introdução de nanopartículas de celulose tem contribuído para o surgimento de uma nova geração de adesivos, em termos de melhoria de desempenho e economia. Dessa forma, a produção de painéis de madeira se apresenta como uma alternativa promissora dessa matéria-prima, pois o aperfeiçoamento da colagem por adesivo é um processo recorrente na indústria de painéis. (MAHRDT et al., 2017; HASELI; LAYEGHI; HOSSEINABADI, 2018; ARAUJO et al., 2019).

Dentre os painéis à base de madeira, se destacam os aglomerados e o MDP (*Medium Density Particleboards*), sendo o segundo o mais avançado devido ao seu processo de fabricação e qualidade geral, com muitas aplicações, principalmente na fabricação de móveis bem como para isolamento térmico e acústico (HANSTED et al., 2019). Estes painéis são fabricados a partir de partículas de madeira, que são unidas por adesivos sintéticos ou outro aglomerante, e se consolidam por meio da aplicação de pressão adequada e temperatura (AMINI et al., 2017; LENGOWSKI et al., 2019a). O adesivo ureia-formaldeído é aplicado em mais de 90% dos painéis produzidos, pois agrega características de baixo custo, ótimo desempenho, facilidade de manuseio, cura rápida, incolor e destinado ao uso interno (FERREIRA, 2017; MOSLEMI et al., 2020). No entanto, a emissão de formaldeído é a principal preocupação associada a esse adesivo, pois pode ser tóxico para a saúde humana e ao meio ambiente (MAHIEU; ALIX; LEBLANC, 2019).

O formaldeído (HCHO), um gás incolor e com cheiro forte, é considerado pela International Agency for Research on Cancer (IARC, 2006) como uma substância com alto poder cancerígeno em humanos. A sua exposição prolongada em ambientes internos pode ocasionar muitos outros sintomas potenciais à saúde, incluindo danos ao sistema nervoso central, distúrbios do sistema imunológico, asma e irritação respiratória (MONKAWA et al., 2015; RESETCO et al., 2016; XING et al., 2017). Assim, a substituição do formaldeído por compostos naturais renováveis, como por exemplo, proteína de soja, cardanol, tanino e nanocelulose pode ser uma maneira de reduzir a utilização do formaldeído.

Neste contexto, destacam-se os nanomateriais de celulose, disponíveis principalmente nas formas de nanofibrilas de celulose (NFC), nanocristais de celulose (CNC) e nanocelulose bacteriana (NBC). Existem inúmeras publicações que tratam da incorporação de nanocelulose na fabricação de painéis a base de madeira. A formulação obtida com 15% em peso de CNF modificado pela adição de 3% por um adesivo de poliamidoamina-epicloro-hidrina (PAE), promoveu aumento dos valores de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) como também reduziu os valores de inchamento em espessura e absorção de água dos painéis aglomerados em comparação sem o uso do adesivo (AMINI et al., 2017). Em outro trabalho, a adição de uma certa quantidade (3% em peso) de celulose microfibrilada (MFC) no adesivo UF mostraram uma melhora no desempenho mecânico na colagem das lamelas de madeira (KWON et al., 2015). No estudo de Moslemi et al. (2020), o CNF foi adicionado entre 0 e 2% em peso ao adesivo UF que foram então usadas para fazer painéis de fibra de média densidade (MDF). Os resultados mostraram que à medida que o CNF foi incorporado ao adesivo UF, o teor de sólidos, a densidade, a viscosidade e o formaldeído livre do adesivo diminuíram e o tempo de gel aumentou.

Portanto, os resultados dessas pesquisas evidenciam o potencial do uso de NFC no desempenho dos painéis de madeira, este adesivo renovável, não tóxico e amigável ao ambiente surge como uma alternativa promissora em substituição aos adesivos sintéticos. Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar um potencial da adição de diferentes proporções de nanofibrilas de celulose (NFC) em substituição ao adesivo ureia-formaldeído (UF) sobre as propriedades físicas e mecânicas dos painéis aglomerados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Painéis de madeira

No Brasil, o segmento de painéis de madeira apresenta grande representatividade para a economia, sendo considerado o sétimo maior produtor mundial. Em 2019, a sua produção chegou ao excepcional patamar de 8,6 milhões de metros cúbicos (IBÁ, 2019). Esse dado mostra que o setor de painéis demonstra grande relevância para a cadeia produtiva florestal, uma vez que o país possui grande potencial de produção de matéria-prima devido suas extensas áreas de cultivo. Neste sentido, é fundamental o investimento em pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias, visto que este setor contribui para geração de empregos nos setores moveleiro e da construção civil (BALDWIN et al., 2017; FAO, 2019).

Os principais produtores de painéis de madeira estão localizados na região Sul e Sudeste do Brasil, sendo o estado de São Paulo o maior exportador do produto, seguido pelo Paraná (APRE, 2018). O *Pinus* spp. é a principal matéria-prima utilizada, especialmente, em razão da sua baixa densidade, alta razão de compactação e disponibilidade em grande escala nas plantações florestais (IWAKIRI et al., 2005; FIORELLI et al., 2014; BALDIN et al., 2016), enquanto o eucalipto em menor quantidade (CABRAL et al., 2007).

Os painéis de madeira reconstituída são produzidos a partir de uma grande diversidade de produtos, consistindo principalmente de elementos de madeira (lâminas, sarrafos, partículas e fibras), ligados entre si por meio de um adesivo sintético e consolidados por meio de aplicação de pressão e temperatura (IWAKIRI et al., 2005; SCORZA et al., 2019). Nas indústrias de painéis de madeira, os adesivos tradicionalmente utilizados são os fenólicos e ureicos (MOUBARIK et al., 2010; ZHAO, et al., 2011; MANTANIS et al., 2018). A escolha do adesivo e a quantidade a ser aplicada torna-se bastante relevante, no sentido de buscar uma fabricação mais econômica e com bom desempenho estrutural (MENDES et al., 2012). Geralmente, os aditivos são incorporados aos adesivos sintéticos, tais como emulsões de parafina e catalisadores (cloreto de amônio ou sulfato de amônio), respectivamente, com o propósito de melhorar a estabilidade dimensional do painel e acelerar a cura do adesivo (GUIMARÃES JUNIOR et al., 2013b; SILVA et al., 2015).

Existem vários fatores que influenciam diretamente na qualidade e no custo final dos painéis de madeira. Dentre eles, temos o tipo e quantidade de adesivo, teor de parafina, razão de compactação, densidade dos painéis, geometria das partículas, temperatura da prensa, o tempo de prensagem, pressão utilizada, entre outros. Esses fatores interagem entre si nos

processos produtivos e são de suma importância nas propriedades dos painéis (MALONEY, 1993; GUIMARÃES JUNIOR et al., 2013b; YE et al., 2007; BEKHTA et al., 2018). Para avaliar as propriedades e qualidade dos painéis, ensaios físicos e mecânicos são realizados com o intuito de verificar se os valores atendem aos requisitos de comercialização NBR 14810-2 (ABNT, 2018). Dentre os ensaios físicos, temos alguns exemplos, como massa específica aparente, teor de umidade, absorção de água, inchamento em espessura e, por fim, os ensaios mecânicos flexão estática, resistência ao arrancamento de parafuso de superfície e de topo, ligação interna e perfil de densidade (BRITO, 2018).

## 2.2 Painéis aglomerados

Dentre os painéis de madeira reconstituída, destacam-se os painéis de partículas de média densidade, mais conhecido como MDP (*Medium Density Particleboard*). É o painel mais produzido e consumido no mundo sendo classificado como painel de média densidade com valores situados entre 550 e 750 kg m<sup>-3</sup> (FRANÇA et al., 2016; ABNT, 2018).

O MDP é considerado uma evolução dos aglomerados, sendo constituídos de três camadas, duas de partículas de menor granulometria nas faces e uma camada com partículas maiores no miolo do painel. Esses painéis são produzidos a partir de qualquer material lignocelulósico e incorporados ao adesivo com aplicação de pressão e temperatura. (MESQUITA et al., 2015). Os aglomerados podem ser aplicados, para fins internos, em móveis, armários, degraus, prateleiras, mesas, portas de correr, mesas de bilhar, escoras e outros produtos industriais (CRAVO et al., 2015; VARANDA et al., 2018). As principais matérias-primas utilizadas são madeiras do gênero *Pinus* e *Eucalyptus* (BARROS FILHO et al., 2011).

Outros materiais lignocelulósicos também podem ser usados na produção de painéis aglomerados como sabugo de milho (SCATOLINO et al., 2015), palha de milho (SILVA et al., 2015), casca de mamona (SILVA et al., 2018), bagaço de sorgo (GUIMARÃES JUNIOR et al., 2016), bagaço de cana (SOARES et al., 2017), entre outros. Segundo Protásio et al. (2015), outra vantagem desses painéis é a possibilidade de reduzir a variabilidade da madeira que é influenciada por fatores químicos, físicos, mecânicos e anatômicos intrínsecos. Entretanto, o principal fator limitante está relacionado a instabilidade dimensional quando submetida a variados teores de umidade absorvida (GUIMARÃES JUNIOR et al., 2013a), devido à alta abundância de grupos hidroxila (OH) presentes nos principais polímeros da parede celular (PAPADOPOULOS, 2010).

O processo produtivo dos painéis aglomerados compreende as seguintes etapas: geração de partículas, classificação, secagem, aplicação de adesivo e aditivos, formação do colchão, pré-prensagem, prensagem a quente, condicionamento, acabamento, classificação e armazenamento (MORAIS et al., 2018; LENGOWSKI et al., 2019a). Na etapa de aplicação do adesivo, a escolha pelo adesivo ureia-formaldeído (UF) é devido suas características como ótima aderência e coesão intrínseca, ser incolor, ao fácil manuseio e aplicação. No entanto, deve-se levar em consideração que esse produto chega a representar 50% do custo total de produção dos painéis (HE et al., 2012; CARVALHO et al., 2014; RIOS et al., 2016; MAHRDT et al., 2017). Além disso, o formaldeído emitido pelos painéis de madeira é considerado como um agente cancerígeno, o que representa uma séria ameaça à saúde das pessoas (HASHIDA; OHARA; MAKINO, 2006).

Portanto, inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas a fim de investigar formas de reduzir a utilização dos adesivos sintéticos ou mesmo a substituição desses por um adesivo natural seguro e ambientalmente amigável (UMEMURA et al., 2012; WIDYORINI et al., 2016). Dentre esses adesivos naturais, temos a adição de partículas de enchimentos ou fibrosas, como o caso da nanocelulose (MAHRDT et al., 2016; GONÇALVES, 2018) que oferece uma alternativa promissora para o desenvolvimento de boas propriedades e de ligação aos painéis aglomerados.

### **2.3 Adesivo ureia-formaldeído**

O formaldeído foi sintetizado, em 1859, pelo químico russo Aleksandr Butlerov a partir da síntese do metileno-glicol (MOREIRA, 2015). Os avanços tecnológicos e estudos experimentais para identificar e desenvolver esse composto somente ocorreram na primeira metade do século XX, que consequentemente permitiram sua produção em larga escala para serem utilizados em diversas aplicações industriais, como na produção de etileno glicol, adesivos sintéticos, papel, tintas e fármacos e desinfetante (MARSAL et al., 2017; FORMACARE, 2019).

Segundo a Transparency Market Research (TMR, 2019), as projeções indicam que o mercado global de formaldeído alcançará uma produção de 36,6 milhões de toneladas para o ano de 2026 e, geralmente, grande parte dessa produção é destinado em adesivos para serem utilizados majoritariamente no setor de construção civil e na indústria automobilística. Destaque para o continente asiático que representa mais de 50% do consumo mundial desse aldeído, visto que toda a sua dinâmica econômica é ligada à produção de produtos hospitalares

(IHS MARKIT, 2019). Neste contexto, o surgimento dos adesivos sintéticos foi de grande importância nas indústrias de painéis de madeira, principalmente, aqueles à base de ureia-formaldeído cuja aplicação representa cerca de 90% dos painéis produzidos no mundo (BORAN; USTA; GÜMÜŞKAYA, 2011; GONÇALVES, 2012).

A ureia-formaldeído (UF) é um adesivo aminoplástico produzido a partir do processo de condensação entre a ureia e o formol, sendo bastante utilizado na fabricação de painéis à base de madeira, como em compensado, aglomerado e MDF (KHANJANZADEH et al., 2019). Esse adesivo desempenha um papel importante, pois é utilizado com a finalidade de promover adesão entre as partículas de madeira e conferir resistência desejável ao painel (ABNT, 2013; JIANG et al., 2018). O seu uso generalizado é devido as suas diversas vantagens, como alta reatividade, solubilidade em água, facilidade de manuseio, resistência a microrganismos, incolor, baixo custo em comparação com outros adesivos sintéticos e restritos a ambientes internos (ZHANG et al., 2013; FERREIRA, 2017). Por outro lado, esse adesivo apresenta como pontos negativos baixa resistência à umidade, além de ser proveniente de fontes não renováveis e emitir grande quantidade de formaldeído no ambiente (CARVALHO et al. 2014).

O formaldeído emitido a partir de painéis à base de madeira é considerado um dos principais poluentes em ambientes internos (LIANG; LV; YANG, 2016), pois tem efeito cancerígeno na saúde humana (IARC, 2006). A sua exposição prolongada pode levar ainda muitos outros riscos potenciais à saúde, incluindo danos ao sistema nervoso central, distúrbios do sistema imunológico, asma e irritação respiratória (MONKAWA et al., 2015; RESETCO et al., 2016). Os níveis de formaldeído expostos ao ar, principalmente, em ambientes internos, são altamente dependentes das fontes de formaldeído, temperatura e umidade. O formaldeído livre residual é a principal fonte de poluição do ar em ambientes fechados, uma vez que estão incorporados em revestimentos do assoalho de madeira, painéis de madeira, papel de parede e tintas, bem como fumaça de cigarro (AYRILMIS et al., 2016b; HE et al., 2012).

Segundo o Instituto Nacional do Câncer (INCA, 2018), o Brasil apresenta uma cadeia econômica bastante diversificada onde existem diversos setores em que os indivíduos são expostos ao formol. Dentre eles, temos os serviços relacionados com a fabricação de adesivos, de plásticos, de tecidos, de madeira, de papel e celulose, de fundição e construção civil, os laboratórios de anatomia e os cabeleireiros. Nesse sentido, uma das maneiras de reduzir a emissão de formaldeído consiste em diminuir a proporção molar de formaldeído ou utilizar agentes modificadores naturais para reagir ou capturar o formaldeído livre no adesivo (AYRILMIS et al., 2016a; GHANI et al., 2018).



Segundo Carvalho et al. (2014), a busca pelo desenvolvimento de adesivos alternativos, provenientes de fontes biodegradáveis e renováveis, apresentando baixa ou nenhuma emissão de formaldeído é uma realidade. Pensando nisso, a aplicação da nanotecnologia com o uso de nanopartículas pode ser uma alternativa promissora e viável, buscando ao menos a substituição parcial dos adesivos sintéticos, o qual possibilita o desenvolvimento de boas propriedades e de ligação aos materiais (GINDL-ALTMUTTER; VEIGEL, 2014).

## 2.4 Nanotecnologia

A nanotecnologia é uma ciência que manuseia, controla e associa átomos ou moléculas pela qual permite estudar e desenvolver os mais diversificados tipos de materiais em escala nanométrica (1-100 nm), sejam eles polímeros, cerâmicas, metais, semicondutores, compósitos e/ou biomateriais. Esses materiais possuem estruturas e componentes que apresentam propriedades e fenômenos físicos, químicos e biológicos significativamente inovadores dada sua escala e por isso, está diretamente relacionada ao emprego de técnicas de síntese ou utilização em processos industriais (DURÁN; MATTOSO; MORAIS, 2006; LAU, YU; NGUYEN, 2017; ODENIYI et al., 2020). A combinação da nanotecnologia juntamente com o estudo da celulose levou ao surgimento de uma nova categoria de material descrita como nanocelulose (CHIRAYIL; MATHEW; THOMAS, 2014), o qual apresenta tanto propriedades e aplicações diferentes da celulose em tamanho micrométrico (LENGOWSKI; et al., 2019b).

A nanocelulose é um nanomaterial renovável e abundante, que vem despertando o interesse de pesquisadores que estudam suas possíveis aplicações, caracterizações e meios de obtenção em escalas industriais devido às características excepcionais em escala nanométrica (BRINCHI et al., 2013; MOYA et al., 2015; DIAS, 2017; MENDONÇA, 2018; THOMAS et al., 2018). Dentre essas, destaca-se a biodegradabilidade, estabilidade química, alta área superficial, leveza, rigidez, alta resistência mecânica e biocompatibilidade (MONDRAGON et al., 2015; FORTUNATI et al., 2016; PHANTHONG et al., 2018). É amplamente explorada em diferentes segmentos da indústria tais como a de papéis e embalagens, construção civil, adesivos estruturais e não estruturais, sendo também utilizada na indústria moveleira, farmacêutica, aeronáutica de cosméticos e de produtos eletrônicos, dentre outros (KALIA et al., 2011; AZEREDO; ROSA; MATTOSO, 2017).

Dependendo do método de obtenção, as nanocelulose podem ser classificadas como: nanocristais, nanowhiskers, nanofibras, celulose microfibrilada (MFC) e nanofibrilas de

celulose (NFC) (NYSTRÖM et al., 2010), sendo as nanofibrilas de celulose, o foco principal desta pesquisa.

## **2.5 Pré-tratamento das fibras e processo para geração de nanocelulose**

A produção de nanofibrilas de celulose geralmente inicia-se com o emprego de pré-tratamentos que tem como principal objetivo a remoção dos constituintes não celulósicos (hemicelulose e lignina) da parede celular da fibra (KIM et al., 2015), facilitando assim o processo de obtenção das nanoestruturas, além de reduzir o tempo consumido no processo e números de procedimentos operacionais juntamente com a redução dos custos energéticos (DUFRESNE, 2013).

Nesse sentido, os métodos utilizados são os tratamentos: físicos (hidrotérmicos, ultrassom) (AITA; SALVI; WALKER, 2011), químicos (alcalinos, branqueamento) (SILVA; D'ALMEIDA, 2009), e físico-químicos (explosão a vapor) (ZHAO; ZHANG; LIU, 2012), com posterior isolamento do material celulósico em nanofibrilas de celulose (MOON et al., 2011).

Segundo Faruk et al. (2012), o tratamento alcalino é o método químico mais utilizado na deslignificação de fibras naturais. Dentro do pré-tratamento alcalino temos o tratamento de polpação, que tem como objetivo solubilizar a lamela média e assim individualizar as fibras. A polpação decorre de uma sequência de processos distintos, porém o dominante no mundo é o processo Kraft, que combina hidróxido de sódio e sulfeto de sódio em pH acima de 12 (D'ALMEIDA et al., 2013; LENGOWSKI et al., 2019b). Após o processo de polpação, são obtidas pastas celulósicas branqueadas e não branqueadas (coloração marrom), devido à presença de muitos radicais cromóforos (COELHO et al., 2014).

A segunda etapa é o branqueamento, processo químico que tem como finalidade melhorar a alvura e a limpeza da polpa celulósica por meio da remoção e/ou modificação de grupos cromóforos e lignina residual, de forma a melhorar as propriedades da polpa (RUDIE; HART, 2012). Após as etapas de polpação e branqueamento, a polpa segue para ser transformada em nanoestruturas.

Essas nanoestruturas podem ser obtidas por meio de processo mecânicos, químicos, físicos e biológicos (DURÁN et al., 2011; FRONE; PANAITESCU; DONESCU, 2011). Segundo Jonoobi, Mathew e Oksman (2012), dentre esses processos de obtenção de nanoestruturas, os métodos mecânicos se destacam por não exigirem matéria-prima previamente tratada. Como este trabalho utilizou processo mecânico de desfibrilação, o foco deste estudo ficará mais restrito a esse processo.

## 2.6 Processo mecânico de desfibrilação

Segundo Gardner et al. (2008), no processo mecânico de desfibrilação são produzidas nanofibrilas com dimensões de 10-100 nm, sendo mantida grande parte da sua fase amorfa. Dentro do processo mecânico de desfibrilação estão inclusos: métodos mecânicos de homogeneização, microfluidização, cryocrushing e micromoagem (desfibrilação), cada um com suas vantagens e desvantagens (SPENCE et al., 2010).

Em geral, esses processos promovem elevado cisalhamento que ocasionam clivagem transversal ao longo do eixo longitudinal da estrutura microfibrilar da celulose, resultando desta forma na extração de nanofibrilas de celulose (MOON et al., 2011). Independente do processo mecânico utilizado, todos esses processos promovem a formação de um gel com alto teor de água e que pode ser transformado em pó quando submetido a um processo de secagem (KOLAKOVIC et al., 2011).

O processo de homogeneização consiste na passagem de uma suspensão que contenha a polpa celulósica juntamente com água, através de um homogenizador mecânico, onde a queda de pressão promove a desfibrilação (ALCALÁ et al., 2013). Contudo, esse processo requer um elevado consumo de energia visto que o grau de fibrilação é diretamente proporcional ao consumo energético (número de passagens da polpa) (CHAUHAN; CHAKRABARTI, 2012).

No método microfluidização, a polpa é forçada a passar através de câmaras finas, sobre alta pressão (SIQUEIRA; BRAS; DUFRESNE, 2010). Enquanto a técnica de *cryocrushing* (maceração em baixíssima temperatura) consiste em congelar as fibras de celulose com azoto líquido e, em seguida, aplicar elevadas forças de cisalhamento visando quebrar as paredes celulares das fibras para libertar as fibrilas da parede celular (SPENCE, 2011). Segundo Hubbe et al. (2008), esse processo se torna mais eficiente com uma refinação prévia das fibras a fim de promover o intumescimento e delaminação dessas.

O processo de micro-moagem, também denominado desfibrilação mecânica é realizado utilizando um moinho que promove a fibrilação das fibras, expondo as camadas mais internas da parede celular, mediante ao fatiamento (descascamento das camadas externas) (YANO; NAKAGAITO, 2004). Neste processo as suspensões contendo as fibras são forçadas a passar através de 2 discos de pedra especialmente modificado e ranhurado, sendo um disco rotativo e outro disco estático (FIGURA 1), esse contato da suspensão de celulose repetidas vezes com as superfícies duras dos discos promovem a desfibrilação das fibras e quebra das ligações de hidrogênio (SIRÓ; PLACKETT, 2010; OSONG; NORGREN; ENGSTRAND, 2016). Sendo a intensidade desta desfibrilação ligada a distância entre os discos de pedra, o desenho de suas

ranhuras e número de passagens entre os discos (KHALIL et al., 2014; KALIA; BOUFI; CELLI, 2014). E a partir desse procedimento, a celulose pode ser reduzida a dimensões muito pequenas, entre 25 e 100 nm (SEHAQUI et al., 2011).

Figura 1 – Moinho *Masscolloider Masuko* (*grinder*).



Fonte: Do autor (2021).

Entretanto, no que se refere à produção de nanofibrilas em escala industrial utilizando processos mecânicos, o alto consumo energético é uma desvantagem. Para solucionar essa desvantagem, busca-se pré-tratamentos enzimáticos, químicos, mecânicos ou a combinação desses a fim de facilitar a etapa de desfibrilação mecânica (TARRÉS et al., 2017; TIBOLLA et al., 2017; WEIGAND et al., 2017).

Outra medida seria a combinação de dois ou mais métodos por possibilitar a produção de nanofibrilas em larga escala e oferecer uma alternativa viável na redução do consumo energético para valores próximo de 1.000 kWh/ton de fibra celulósica (SIRÓ; PLACKETT, 2010), podendo-se destacar os pré-tratamentos químicos ou enzimáticos que facilitam no processo de desfibrilação (SYVERUD et al., 2011; SIDDIQUI et al., 2012). Nesse sentido, Mariano, Kissi e Dufresen (2014) e Kargarzadeh et al. (2018) afirmam que essa é uma etapa muito importante do processo, pois pode promover a acessibilidade, aumentar a área de superfície interna e a reatividade da celulose, além de alterar a cristalinidade e quebrar as ligações de hidrogênio.

## 2.7 Nanofibrilas de celulose (NFC)

De acordo com a publicação do relatório do Nanocellulose Market (2020), a produção de nanocelulose deve aumentar de 297 milhões em 2019 para 783 milhões de dólares em 2025,

sendo que o tipo de celulose nanofibrilada representará 58% do mercado mundial. As nanofibrilas de celulose (NFC) são um tipo de nanocelulose produzidas por um processo de homogeneização ou moagem. Podem também ser denominadas de celulose nanofibrilada (CNF), celulose microfibrilada (MFC) ou microfibrilas de celulose (CMF) (LAVOINE et al. 2012; FOSTER et al., 2018; NASCIMENTO et al., 2018).

Segundo Klemm et al. (2011), as nanofibrilas de celulose são originadas a partir da desintegração mecânica das fibras celulósicas, sobretudo de suas superfícies, promovendo o rompimento da parede celular e a posterior exposição das fibrilas e microfibrilas, que estavam anteriormente situadas no interior das fibras.

Uma das possíveis formas de gerar as nanoestruturas por meio do processo de moagem é por meio da utilização de um moinho microfibrilador especializado denominado *grinder*, cujo mecanismo consiste em quebrar as ligações de hidrogênio mediante forças de cisalhamento que consequentemente ocasiona a individualização de feixes de microfibrilas da estrutura em multicamadas da parede celular (SIRÓ; PLACKETT, 2010; OSONG; NORGREN; ENGSTRAND, 2016).

A NFC apresenta sua arquitetura molecular constituída de unidades fibrilares resultantes da combinação linear das macromoléculas de celulose de regiões amorfas e cristalinas alternadas, com capacidade de formar uma rede emaranhada longa, fina e flexível (GUIMARÃES JUNIOR et al., 2015; ROJAS; BEDOYA; CIRO, 2015; SAMYN et al., 2018). Essas nanoestruturas possuem seção transversal na faixa de 3 a 100 nm e comprimento de até 100  $\mu\text{m}$ , dependendo da fonte e do método de produção (LAVOINE et al., 2012; OSONG; NORGREN; ENGSTRAND, 2016; ISO, 2017).

Essas apresentam um comportamento semelhante a um gel viscoso esbranquiçado, com baixas concentrações de (1-2%) de teor de sólidos (KLEMM et al., 2011; KHALIL et al., 2014; VENTURA et al., 2020). São produzidas de forma segura e sustentável a partir de recursos da biomassa lignocelulósica (KRISHNAMACHARI; HASHAIKEH; TINER, 2011). Sendo a fonte primordial para o desenvolvimento deste nanomaterial a parede celular dos vegetais que são constituídos, principalmente, de celulose, hemicelulose e lignina (KHALIL et al., 2014; MIAO et al. 2014; ISOGAI; ZHOU, 2019; JASMANI et al., 2020).

Segundo a literatura para a geração das NFC, o material mais utilizado é a polpa kraft branqueada comercial proveniente de folhosas ou coníferas (SPENCE et al., 2010; SYVERUD et al., 2011; LAVOINE et al., 2012; VIANA, 2013), o que é reportado em vários trabalhos descritos em literatura (WANG et al., 2015; POTULSKI et al., 2016; TONOLI et al., 2016; ZHANG et al., 2016; AMINI et al., 2017). Contudo, a utilização de outras fontes de fibras

lignocelulósicas vem sendo bastante estudada visando a obtenção de nanofibrilas tais como: casca de arroz (MOSLEMI et al., 2020), bambu (ZHANG et al., 2012), casca da soja (LI et al., 2018), palha de arroz, bagaço e colmo de algodão (ADEL et al., 2016), fibras da bananeira (ELANTHIKKAL et al., 2010; ABRAHAM et al., 2011), juta e abacaxi (ABRAHAM et al., 2011), palmeira (OWOLABI et al., 2016), algodão (CHEN et al., 2014), dentre outras.

## **2.8 Nanocelulose em adesivo para painéis de madeira**

A incorporação de nanoestruturas a base de celulose em adesivos para a indústria de painéis de madeira já é uma realidade observada no cenário acadêmico atual, verificada pela presença de inúmeros estudos a respeito desta temática. Nesse contexto, Veigel et al. (2012) avaliando a mistura adesiva de diferentes concentrações de CNF (0, 1 e 3% em peso com base na resina) em adesivo UF e melanina ureia formaldeído (MUF) para a produção de painéis de partículas orientadas (OSB), observaram que painéis com UF contendo 1% de CNF apresentaram menores alterações volumétricas após 24 horas de imersão em água, além de melhores resistência a flexão e a ligação interna quando comparadas a painéis produzido apenas com UF puro.

Mahrtdt et al. (2016) investigaram os efeitos da adição de nanofibrila de celulose (5%) em adesivo UF e sua aplicação em painéis aglomerados. Os autores observaram que a adição de MFC promoveu alterações nas propriedades do adesivo (aumento da viscosidade e gel time), bem como melhoria nas propriedades mecânicas dos painéis quando comparados a painéis produzidos com UF puro. Ayrilmis et al. (2016a) observaram redução de até 30% de orgânicos voláteis quando se adiciona MFC em resina amínica visando a produção de laminados de madeira. Os autores atribuem esse fato ao efeito de barreira promovido pela nanoestrutura que absorve formaldeído livre.

Enquanto Amini et al. (2017) observaram que o incremento de 15% para 20% em peso seco de nanofibrilas de celulose em painéis aglomerados não alterou as propriedades mecânicas de módulo de elasticidade (MOE), contudo as propriedades de módulo de ruptura (MOR) foram significativamente alteradas. Hansted et al. (2019), avaliando as propriedades físicas de painéis de partículas de densidade média (MDP) após a adição de diferentes proporções de nanocelulose em adesivo ureia-formaldeído (UF), encontraram que a adição de nanocelulose não promove alterações na densidade e no teor de umidade dos painéis, contudo essa incorporação promove alterações nas superfícies destes painéis, tornando-as menos irregular.

Já Moslemi et al. (2020), avaliando a incorporação de celulose nanofibrilada em painéis MDP, utilizando diferentes concentrações de nanoestruturas (0,5, 1,5 e 2,0 % em peso seco de adesivo) observaram redução da viscosidade, gel time e teor de sólidos, e diminuição na emissão de formaldeído da UF, sendo as maiores emissões de formaldeído observadas para painéis utilizando a ureia formaldeído pura. Em relação as propriedades dos painéis, os autores observaram incremento das propriedades de MOR, MOE e IE com incremento de nanocelulose durante seu processo de produção.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas observações descritas em literatura foi observada uma crescente produção e demanda de painéis de madeira. Entretanto, as atuais preocupações com as questões ambientais e de saúde associadas à emissão de formaldeído, fizeram com que esse setor buscasse novas alternativas no intuito de mitigar esse problema. Neste contexto, a indústria de painéis, principalmente no setor de adesivo tem encontrado um novo aliado, a nanotecnologia.

A nanotecnologia associada ao estudo da celulose possibilitou o desenvolvimento de uma nova classe denominada nanocelulose. Em muitos trabalhos tem sido demonstrado o potencial dessas nanoestruturas para ser incorporada em painéis de madeira, devido a melhoria de suas propriedades, bem como redução dos índices de emissão de formaldeído no ambiente.

Contudo, a literatura carece de informações, a respeito dos parâmetros ideais de produção de nanoestruturas a serem incorporadas nesses painéis. Com base nessas lacunas nesta revisão, foi proposto um experimento no qual buscou-se melhores concentrações de nanofibrilas de celulose para serem adicionadas nos painéis aglomerados. Dessa forma, o presente trabalho traz perspectivas a respeito da incorporação de uma nova tecnologia associada à tradicional indústria de painéis.



## REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, E.; DEEPA, B.; POTHAN, L. A.; JACOB, M.; THOMAS, S.; CVELBAR, U.; ANANDJIWALA, R. Extraction of nanocellulose fibrils from lignocellulosic fibres: A novel approach. **Carbohydr. Polym.**, v. 86, p. 1468-1475, 2011.
- ADEL, A. M.; EL-GENDY, A. A.; DIAB, M. A.; ABOU-ZEID, R. E; EL-ZAWAWY, W. K.; DUFRESNE, A. Microfibrillated cellulose from agricultural residues. Part I: Papermaking application. **Ind. Crop Prod.**, v. 93 p. 161-174, 2016.
- AITA, G. A.; SALVI, D. A.; WALKER, M. S. Enzyme hydrolysis and ethanol fermentation of dilute ammonia pretreated energy cane. **Bioresour. Technol.**, v. 102, n. 6, p. 4444-4448, 2011.
- ALCALÁ M.; GONZÁLEZ, J.; BOUFI, S.; VILASECA, F.; MUTJÉ, P. All-cellulose composites from unbleached hardwood kraft pulp reinforced with nanofibrillated cellulose. **Cellulose**, v. 20, p. 2909-2921, 2013.
- AMINI, E.; TAJVIDI, M.; GARDNER, D. J.; BOUSFIELD, D. W. Utilization of cellulose nanofibrils as a binder for particleboard manufacture. **BioRes.**, v.12, n. 2, p. 4093-4110. 2017.
- ARAÚJO, C. K. C.; CAMPOS, C. I.; CAMARGO, S. K. C. A.; CAMARGO, B. S. Caracterização mecânica de painéis particulados de média densidade produzidos a partir de resíduos de madeira. **R. Gest. Industr.**, v. 15, n. 1, p. 197-211, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-1**: Painéis de partículas de média densidade – Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO PARANAENSE DE EMPRESA DE BASE FLORESTAL. **Estudo Setorial APRE 2017/2018**. Curitiba, 2018. Disponível em: <[https://www.apreflorestas.com.br/wp-content/uploads/2018/02/Estudo-Setorial-2018\\_APRE.pdf](https://www.apreflorestas.com.br/wp-content/uploads/2018/02/Estudo-Setorial-2018_APRE.pdf)>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- AYRILMIS, N.; KWON, J. H.; LEE, S. H.; HAN, T. H.; PARQUE, C. W. Microfibrillated-Cellulose-Modified Urea-Formaldehyde Adhesives with Different F/U Molar Ratios for Wood-Based Composites. **J. Adhes. Sci. Tech.**, v. 30, n. 18, p. 2032-2043, 2016a.
- AYRILMIS, N.; LEE, Y.-K.; KWON, J. H.; HAN, T.-H.; KIM, H.-J. Formaldehyde emission and VOCs from LVLs produced with three grades of urea-formaldehyde resin modified with nanocellulose. **Build. Environ.**, v. 97, p. 82-87, 2016b.
- AZEREDO, H. M. C.; ROSA, M. F.; MATTOSO, L. H. C. Nanocellulose in bio-based food packaging applications. **Ind. Crop Prod.**, v. 97, p. 664-671, 2017.
- BALDIN, T.; SILVEIRA, A. G.; VIDRANO, B. R. A.; CANCIAN, L. C.; SPATT, L. L.; HASELEIN, C. R. Qualidade de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e capim-annoni. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, v. 11, n. 3, p. 230-237, 2016.

BALDWIN, R. F.; KURPIEL, F. T.; BALDWIN, R. W. Growth and reinvention 2017 a north american perspective on the global wood-based panel industry. **For. Prod. J.**, v. 67, n. 3, p.144-151, 2017.

BARROS FILHO, R. M.; MENDES, L. M.; NOVACK, K. M.; APRELINI, L. O.; BOTARO, V. R. Hybrid chipboard panels based on sugarcane bagasse, urea formaldehyde and melamine formaldehyde resin. **Ind. Crop Prod.**, v. 33, n. 2, p. 369-373, 2011.

BEKHTA, P.; KRYSIOFIK, T.; PROSZYK, S.; LIS, B. Surface gloss of lacquered medium density fibreboard panels veneered with thermally compressed birch wood. **Prog. Org. Coat.**, v. 117, p. 10-19, 2018.

BIANCHE, J. J.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, F. A.; SANTOS, R. C.; SORATTO, D. N. Propriedades de painéis aglomerados fabricados com partículas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), paricá (*Schizolobium amazonicum*) e vassoura (*Sida* spp.). **Cerne**, v. 18, n. 4, p. 623-630, 2012.

BORAN, S.; USTA, M.; GÜMÜŞKAYA, E. Decreasing formaldehyde emission from medium density fiberboard panels produced by adding different amine compounds to urea formaldehyde resin. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 31, n. 7, p. 674-678, 2011.

BOUFI, S.; KADDAMI, H.; DUFRESNE, A. Mechanical performance and transparency of nanocellulose reinforced polymer nanocomposites. **Macromol. Mater. Eng.**, v. 299, n. 5, p. 560-568, 2014.

BRINCHI, L. COTANA, F.; FORTUNATI, E.; KENNY, J. M. Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: technology and applications. **Carbohydr. Polym.**, v. 94, p. 154-169, 2013.

BRITO, F. M. S. **Produção e avaliação da qualidade de painéis aglomerados constituídos por partículas de bagaço de cana-de-açúcar e bambu.** 2018. 214 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

CABRAL, C. P.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; PIMENTA, A. S. Properties of particleboards manufactured with mixed particles from *Eucalyptus* spp and *Pinus elliottii*. **Rev. Árvore**, v. 31, n. 5, p. 897-905, 2007.

CARVALHO, A. G.; ZANUNCIO, A. J. V.; MENDES, R. F.; MORI, F. A.; SILVA, M. G.; MENDES, L. M. Adesivos tânicos de *Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville na produção de painéis aglomerados. **Rev. Árvore**, v. 38, n. 1, p. 195-202, 2014.

CHAUHAN V. S.; CHAKRABARTI S. K. Use of nanotechnology for high performance cellulosic and papermaking products. **Cellul. Chem. Technol.**, v. 46, p. 389-400, 2012.

CHEN, W.; ABE, K.; UETANI, K.; YU, H.; LIU, Y.; YANO, H. Individual cotton cellulose nanofibers: Pretreatment and fibrillation technique. **Cellulose**, v. 21, n. 3, p. 1517-1528, 2014.

CHIRAYIL, C. J.; MATHEW, L.; THOMAS, S. Review of recent research in nano cellulose preparation from different lignocellulosic fibers. **Rev. Adv. Mater. Sci.**, v. 37, p. 20-28, 2014.

COELHO, G. A. WEINSCHUTZ, R.; DALLAVALLI, M. J.; MATHIA, Á. L. Fotodegradação heterogênea de efluente de polpa kraft branqueada com cloro. **Rev. Árvore**, v. 38 n. 5, p. 927-934, 2014.

CRAVO, J. C. M.; SARTORI, D. L.; MÁRMOL, G.; BALIEIRO, J. C. C.; MACHADO, G. O.; FIORELLI, J. Manufacture of particleboard based on cement bag and castor oil polyurethane resin. **Constr. Build. Mater.**, v. 87, p. 8-15, 2015.

D'ALMEIDA, M. L. O.; KOGA, M. E. T.; FERREIRA, D. C.; PIGOZZO, R. J. B.; TOUCINI, R.; REIS, H. M.; VIANA, E. D. **Celulose**. São Paulo: SENAI, 2013.

DIAS, M. C. **Alkaline pre-treatments and different parameters as facilitators for obtaining cellulose nanofibrils**. 2017. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

DUFRESNE, A. Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial. **Mater. Today Commun.**, v. 16, n. 6, p. 220-227, 2013.

DURÁN, N.; LEMES, A. P.; DURÁN, M.; FREER, J.; BAEZA, J. A minireview of cellulose nanocrystals and its potential integration as co-product in bioethanol production. **J. Chil. Chem. Soc.**, v. 56, n. 2, p. 672-677, 2011.

DURÁN, N.; MATTOSO, L. H. C.; MORAIS, P. C. **Nanotecnologia**: introdução, preparação e caracterização de nanomateriais e exemplos de aplicação. São Paulo: Artliber, 2006.

ELANTHIKKAL, S.; GOPALAKRISHNAPANICKER, U.; VARGHESE, S.; GUTHRIE, J. T. Cellulose microfibrils produced from banana plant wastes: Isolation and characterization. **Carbohydr. Polym.**, v. 80, p. 852-859, 2010.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H.-P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers. **Prog. Polym. Sci.**, v. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012.

FERREIRA, J. C. **Sínteses de adesivos de ureia-formaldeído com adição de lignina kraft e celulose nanocristalina**. 2017. 107 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.

FIORELLI, J.; GOMIDE, C. A.; LAHR, F. A. R.; NASCIMENTO, M. F.; SARTORI, D. L.; BALLESTEROS, J. E. M.; BUENO, S. B.; BELINI, U. L. Physico-chemical and anatomical characterization of residual lignocellulosic fibers. **Cellulose**, v. 21, n. 5, p. 3269-3277, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO Statistics: Forest Products 2017**. Roma, 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca5703m/ca5703m.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

FORMACARE. **History of Formaldehyde**. Brussels, 2019. Disponível em: <<https://www.formacare.eu/about-formaldehyde/history-of-formaldehyde/>>. Acesso em: 15 set. 2020.

FORTUNATI, E.; LUZI, F.; JIMÉNEZ, A.; GOPAKUMAR, D. A.; PUGLIA, D.; THOMAS, S.; KENNY, J. M.; CHIRALT, A.; TORRE, L. Revalorization of sunflower stalks as novel sources of cellulose nanofibrils and nanocrystals and their effect on wheat gluten bionanocomposite properties. **Carbohydr. Polym.**, v. 149, p. 357-368, 2016.

FOSTER, E. J. et al. Current characterization methods for cellulose nanomaterials. **Chem. Soc. Rev.**, v. 47, p. 2609-2679, 2018.

FRANÇA, M. C.; CUNHA, A. B.; TRIANOSKI, R.; SCHIMALSKI, M. B.; RIOS, P. D'A. Produção de painéis aglomerados homogêneos a partir de fibras oversize residuais de uma indústria de MDF. **Sci. For.**, v. 44, n. 111, p. 665-674, 2016.

FRONE, A. N.; PANAITESCU, D. M.; DONESCU, D. Some aspects concerning the isolation of cellulose micro- and nano- fibers. **U.P.B. Sci. Bull., Series B**, v. 73, p. 133-152, 2011.

GARDNER, D. J.; OPORTO, G. S.; MILLS, R.; SAMIR, M. A. S. A. Adhesion and Surface Issues in Cellulose and Nanocellulose. **J. Adhes. Sci. Technol.**, v. 22, p. 545-567, 2008.

GHANI, A.; ASHAARI, Z.; BAWON, P.; LEE, S. H. Reducing formaldehyde emission of urea formaldehyde-bonded particleboard by addition of amines as formaldehyde scavenger. **Build. Environ.**, v. 142, p. 188-194, 2018.

GINDL-ALTMUTTER, W.; VEIGEL, S. Nanocellulose-modified Wood Adhesives. In: OKSMAN, K.; MATHEW, A. P.; BISMARCK, A.; ROJAS, O.; SAIN, M. (Eds.). **Handbook of Green Materials**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2014. pp. 253-264.

GONÇALVES, F. G. **Painéis aglomerados de madeira de *Acacia mangium* com adesivos de ureia-formaldeído e tanino em pó da casca de *Acacia mearnsii***. 2012. 94 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

GONÇALVES, M. L. **Caracterização da capacidade adesiva das misturas ácido cítrico/tanino e ácido cítrico/lignina para painéis de madeira aglomerada (MDP)**. 2018. 76 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Tecnológica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

GUIMARÃES JUNIOR, M.; BOTARO, V. R.; NOVACK, K. M.; FLAUZINO NETO, W. P.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H. D. Preparation of Cellulose Nanofibrils from Bamboo Pulp by Mechanical Defibrillation for Their Applications in Biodegradable Composites. **J. Nanosci. Nanotechnol.**, v. 15, n. 9, p. 6751-6768, 2015.

GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; GUIMARÃES, B. M. R.; MELO, R. R. Efeito do teor da parafina nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados de *Pinus oocarpa*. **Braz. J. Wood Sci.**, v. 4, n. 1, p. 72-82, 2013a.

GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; GUIMARÃES, B. M. R.; MELO, R. R. Efeito do teor da parafina nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados de *Pinus oocarpa*. **Braz. J. Wood Sci.**, v. 4, n. 1, p. 72-82, 2013b.

GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; XAVIER, M. M.; SANTOS, T. S.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Inclusão de resíduo da cultura de sorgo em painéis aglomerados de eucalipto. **Pesq. flor. bras.**, v. 36, n. 88. p. 435-442, 2016.

HANSTED, F. A. S.; HANSTED, A. L. S.; PADILHA, E. R. D.; CARASCHI, J. C.; GOVEIA, D.; CAMPOS, C. I. The use of nanocellulose in the production of medium density particleboard panels and the modification of its physical properties. **BioResources**, v. 14, n. 3, p. 5071-5079, 2019.

HASELI, M.; LAYEGHI, M.; HOSSEINABADI, H. Z. Characterization of blockboard and battenboard sandwich panels from date palm waste trunks. **Measurement**, v. 124, p. 329-337, 2018.

HASHIDA, K.; OHARA S.; MAKINO, R. Improvement of formaldehyde-scavenging ability of condensed tannins by ammonia treatment. **Holzforschung**, v. 60, n. 20, p.178-183, 2006.

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

HUBBE, M. A.; ROJAS, O. J.; LUCIA, L. A.; SAIN, M. Cellulosic Nanocomposites: A review. **Bioresources**, v. 3, p. 929-980, 2008.

IHS MARKIT. **Retrieved from Chemical Economics Handbook: 2019**. London, 2019. Disponível em: <<https://ihsmarkit.com/products/chemical-economics-handbooks.html>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório de 2019**. Brasília, 2019. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DO CÂNCER. **Formol**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://www.inca.gov.br/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/solventes/formol>>. Acesso em: 24 dez. 2020.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans**. Lyon, 2006. Disponível em: <<https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/06/mono86.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

ISOGAI, A.; ZHOU Y. Diverse nanocelluloses prepared from TEMPO-oxidized wood cellulose fibers: nanonetworks, nanofibers, and nanocrystals. **Curr. Opin. Solid. State Mater. Sci.**, v. 23, n. 2, p. 101-106, 2019.

IWAKIRI, S.; ANDRADE, A. S.; CARDOSO JUNIOR, A. A.; CHIPANSKI, E. R.; PRATA, J. G.; ADRIAZOLA, M. K. O. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melanina-ureia-formaldeído. **Cerne**, v. 11, n. 4, p. 323-328, 2005.

JASMANI, L.; RUSLI, R.; KHADIRAN, T.; JALIL, R.; ADNAN, S. Application of Nanotechnology in Wood-Based Products Industry: A Review. **Nanoscale Res. Lett.**, v. 15, p. e207, 2020.

JIANG, W.; TOMPPO, L.; PAKARINEN, T.; SIRVIÖ, J. A.; LIIMATAINEN, H.; HAAPALA, A. T. Effect of cellulose nanofibrils on the bond strength of polyvinyl acetate and starch adhesives for wood. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 2283-2292, 2018.

JONOBI, M.; MATHEW, A.P.; OKSMAN, K. Producing low-cost cellulose nanofiber from sludge as new source of raw materials. **Ind. Crop Prod.**, v. 40, p. 232-238, 2012.

KALIA, S.; BOUFI, S.; CELLI, A. nanofibrillated cellulose; surface modification and potencial applications. **Colloid. Polym. Sci.**, v. 292, p. 5-31, 2014.

KALIA, S.; DUFRESNE, A.; CHERIAN, B. M.; KAITH, B. S.; AVÉROUS, L.; NJUGUNA, J. Cellulose-based bio- and nanocomposites: A review. **Int. J. Polym. Sci.**, v. 2011, p. e837875, 2011.

KANG, X.; SUN, P.; KUGA, S.; WANG, C.; ZHAO, Y.; WU, M.; HUANG, Y. Thin cellulose nanofiber from corncob cellulose and its performance in transparent nanopaper. **ACS Sustain. Chem. Eng.**, v. 5, n. 3, p. 2529-2534, 2017.

KARGARZADEH, H.; MARIANO, M.; GOPAKUMAR, D.; AHMAD, I.; THOMAS, S.; DUFRESNE, A.; HUANG, J.; LIN, N. Advances in cellulose nanomaterials. **Cellulose**, v. 25, p. 2151-2189, 2018.

KHALIL, H. P. S. A.; DAVOUDPOUR, Y.; ISLAM, MD. N.; MUSTAPHA, A.; SUDESH, K.; DUNGANI, R.; JAWAID, M. Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review. **Carbohydr. Polym.**, v. 99, p. 649-665, 2014.

KHANJANZADEH, H.; BEHROOZ, R.; BAHRAMIFA, N.; PINKL, S.; GINDL-ALTMUTTER, W. Application of surface chemical functionalized cellulose nanocrystals to improve the performance of UF adhesives used in wood based composites – MDF type. **Carbohydr. Polym.**, v. 206, p. 11-20, 2019.

KIM, J. H.; SHIM, B. S.; KIM, H. S.; LEE, Y.-L.; MIN, S.-K.; JANG, D.; ABAS, Z.; KIM, J. Review of Nanocellulose for Sustainable Future Materials. **Int. J. Pr. Eng. Man.-GT**, v. 2, n. 2, p. 197-213, 2015.

KLEMM, D.; KRAMER, F.; MORITZ, S.; LINDSTRÖM, T.; ANKERFORS, M.; GRAY, D.; DORRIS, A. Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. **Angew. Chem. Int. Ed.**, v. 50, p. 5438-5466, 2011.

KOLAKOVIC, R.; PELTONEN, L.; LAAKSONEN, T.; PUTKISTO, K.; LAUKKANEN, A.; HIRVONEN, J. Spray-dried cellulose nanofibers as novel tablet excipient. **AAPS PharmSciTech**, v. 12, n. 4, p. 1366-1373, 2011.

KRISHNAMACHARI, P.; HASHAIKEH, R.; TINER, M. Modified Cellulose Morphologies and Its Composites; Sem and Tem Analysis. **Micron**, v. 42, p. 751-761, 2011.

KWON, J. H.; LEE, S.-H.; AYRILMIS, N.; HAN, T. H. Tensile shear strength of wood bonded with urea-formaldehyde with different amounts of microfibrillated cellulose. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 60, p. 88-91, 2015.

LAU, H. C.; YU, M.; NGUYEN, Q. P. Nanotechnology for oilfield applications: Challenges and impact. **J. Pet. Sci. Eng.**, v. 157, p. 1160-1169, 2017.

LAVOINE, N.; DESLOGES, I.; DUFRESNE, A.; BRAS, J. Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: a review. **Carbohydr. Polym.**, v. 90, p. 735-764, 2012.

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JR., E. A.; KUMODE, M. M. N.; CARNEIRO, M. E.; SATYANARAYANA, K. G. Nanocellulose-Reinforced Adhesives for Wood-Based Panels. In: INAMUDDIN; THOMAS, S.; MISHRA, R. K.; ASIRI, A. M. (Eds.). **Sustainable Polymer Composites and Nanocomposites**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2019a. pp. 1001-1025.

LENGOWSKI, E. C.; BONFATTI JR., E. A.; KUMODE, M. M. N.; CARNEIRO, M. E.; SATYANARAYANA, K. G. Nanocellulose in the Paper Making. In: INAMUDDIN; THOMAS, S.; MISHRA, R. K.; ASIRI, A. M. (Eds.). **Sustainable Polymer Composites and Nanocomposites**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2019b. pp. 1027-1066.

LI, P.; WANG, Y.; HOU, Q.; LI, X. Isolation and Characterization of Microfibrillated Cellulose from Agro-industrial Soybean Residue (Okara). **BioResources**, v. 13, p. 7944-7956, 2018.

LIANG, W.; LV, M.; YANG, X. The effect of humidity on formaldehyde emission parameters of a medium-density fiberboard: Experimental observations and correlations. **Build. Environ.**, v. 101, p. 110-115, 2016.

LOPES, P. V. **Preparo e ensaio antimicrobiano de biopolímero formado por membrana de celulose bacteriana associada a nanopartículas de dióxido de titânio**. 2019. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

MAHIEU, A.; ALIX, S.; LEBLANC, N. Properties of particleboards made of agricultural by-products with a classical binder or self-bound. **Ind. Crop Prod.**, v. 130, p. 371-379, 2019.

MAHRDT, E. et al. Adhesive distribution related to mechanical performance of high density wood fibre board. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 78, p. 23-27, 2017.

MAHRDT, E.; PINKL, S.; SCHMIDBERGER, C.; HERWIGNEN, H. W. G. V.; VEIGEL, S.; GINDL-ALTMUTTER, W. Effect of addition of microfibrillated cellulose to urea-formaldehyde on selected adhesive characteristics and distribution in particle board. **Cellulose**, v. 22, p. 571-580, 2016.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. São Francisco: Miller Freeman, 1993.

MANTANIS, G. I.; ATHANASSIADOU, E. T.; BARBU, M. C.; WIJNENDAELE, K. Adhesive systems used in the European particleboard, MDF and OSB industries. **Wood Mater. Sci. Eng.**, v. 13, n. 2, p. 104-116, 2018.

MARIANO, M.; KISSI, N. E.; DUFRESEN A. Cellulose nanocrystals and related nanocomposites: Review of some properties and challenges. **J. Polym. Sci. B Polym. Phys.**, v. 52, p. 791-806, 2014.

MARSAL, A.; CUADROS, S.; MANICH, A. M.; IZQUIERDO, F.; FONT, J. Reduction of the formaldehyde content in leathers treated with formaldehyde resins by means of plant polyphenols. **J. Clean. Prod.**, v. 148, p. 518-526, 2017.

MENDES, R. F.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; SANTOS, R. C.; CÉSAR, A. A. S. Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. **Ci. Fl.**, v. 22, n. 1, p. 161-170, 2012.

MENDONÇA, M. C. **Pré-tratamentos alcalinos como facilitadores da obtenção de nanofibrilas de polpas celulósicas não branqueadas**. 2018. 66 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

MESQUITA, R. G. A.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; TONOLI, G. H. D.; MARCONCINI, J. M. Inclusão de feixes de sisal na produção de painéis MDP de eucalipto. **Sci. For.**, v. 43, n. 105, p. 75-82, 2015.

MIAO, Q.; CHEN, L.; HUANG, L.; TIAN, C.; ZHENG, L.; NI, Y. A process for enhancing the accessibility and reactivity of hardwood kraft-based dissolving pulp for viscose rayon production by cellulase treatment. **Bioresour. Technol.**, v. 154, p. 109-113, 2014.

MONDRAGON, G.; PEÑA-RODRIGUEZ, C.; GONZÁLES, A.; ECEIZA, A.; ARBELAIZ, A. Bionanocomposites based on gelatin matrix and nanocellulose. **Eur. Polym. J.**, v. 62, p. 1-9, 2015.

MONKAWA, A.; GESSEI, T.; TAKIMOTO, Y; JO, N.; WADA, T.; SANARI, N. Highly sensitive and rapid gas biosensor for formaldehyde based on an enzymatic cycling system. **Sens. Actuators B Chem.**, v. 210, p. 241-247, 2015.

MOON, R. J.; MARTINI, A.; NAIRN, J.; SIMONSEN, J.; YOUNGBLOOD, J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. **Chem. Soc. Rev.**, n. 40, p. 3941-3994, 2011.

MORAIS, W. W. C.; HASELEIN, C. R.; SUSIN, F.; VIVIAN, M. A.; SOUZA, J. T. Uso de *Bambusa tuldoidea* e *Eucalyptus grandis* para confecção de painéis aglomerados. **Ci. Fl.**, v. 28, n. 2, p. 746-757, 2018.

MOREIRA, C. S. Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos: formaldeído (CAS 50-00-0). **Rev. Virtual Quim.**, v. 7, n. 4, p. 1594-1601, 2015.

MOSLEMI, A.; ZOLFAGHARLOO, M.; BEHZAD, T.; PIZZI, A. Addition of cellulose nanofibers extracted from rice straw to urea formaldehyde resin; effect on the adhesive characteristics and medium density fiberboard properties. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 99, p. e102582, 2020.



MOUBARIK, A.; ALLAL, A.; PIZZI, A.; CHARRIER, F.; CHARRIER, B. C. Preparation and mechanical characterization of particleboard made from maritime pine and glued with bio-adhesives based on cornstarch and tannins. **MADERAS-CIENC. TECNOL.**, v. 12, n. 3, p. 189-197, 2010.

MOYA, R.; RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, A.; VEJA-BAUDRIT, L.; ÁLVARES, V. Effects of adding nano-clay (montmorillonite) on performance of polyvinyl acetate (PVAc) and urea-formaldehyde (UF) adhesives in *Carapa guianensis*, a tropical species. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 59, p. 62-70, 2015.

NANOCELLULOSE MARKET. **Nanocellulose Market by Type (MFC & NFC, CNC/NCC, and Others), Application (Pulp&paper, composites, biomedical & pharmaceutical, electronics & sensors, and others), Region (Europe, North America, APAC, and Rest of World) – Global Forecast to 2025.** Northbrook, 2020. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/nano-cellulose-market-56392090.html>>. Acesso em: 10 maio 2020.

NASCIMENTO, D. M.; NUNES, Y. L.; FIGUEIRÊDO, M. C. B.; AZEREDO, H. M. C.; AOUADA, F. A.; FEITOSA, J. P. A.; ROSA, M. F.; DUFRESNE, A. Nanocellulose nanocomposite hydrogels: technological and environmental issues. **Green Chem.**, v. 20, p. 2428-2448, 2018.

NYSTRÖM, G.; MIHRANYAN, A.; RAZAQ, A.; LINDSTRÖM, T.; NYHOLM, L.; STRÖMME, M. Nanocellulose Polyrrole Composite Based on Microfibrillated Cellulose from Wood. **J. Phys. Chem. B**, v. 114, n. 12, p. 4178-4182, 2010.

ODENIYI, M. A.; OKUMAH, V. C.; ADEBAYO-TAYO, B. C.; ODENIYI, O. A. Green synthesis and cream formulations of silver nanoparticles of *Nauclea latifolia* (African peach) fruit extracts and evaluation of antimicrobial and antioxidant activities. **Sustain. Chem. Pharm.**, v. 15, p. e100197, 2020.

OSONG, S. H.; NORGRÉN, S.; ENGSTRAND, P. Processing of wood-based microfibrillated cellulose and nanofibrillated cellulose, and applications relating to papermaking: a review. **Cellulose**, v. 23, n. 1, p. 93-123, 2016.

OWOLABI, A. W. T.; ARNIZA, G.; DAUD, W. W.; ALKHARKHI, A. F. M. Effect of Alkaline Peroxide Pre-treatment on Microfibrillated Cellulose from Oil Palm Fronds Rachis Amenable for Pulp and Paper and Bio-composite Production. **BioResources**, v. 11, n. 2, p. 3013-3026, 2016.

PAPADOPOULOS, A. N. Chemical modification of solid wood and wood raw material for composites production with linear chain carboxylic acid anhydrides: A brief review. **BioResources**, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2010.

PHANTHONG, P.; REUBROYCHAROEN, P.; HAO, X.; XU, G.; ABUDULA, A.; GUAN, G. Nanocellulose: extraction and application. **Carbon Resour. Convers.**, v. 1, p. 32-43, 2018.

POTULSKI, D. C.; VIANA, L. C.; MUNIZ, G. I. B.; ANDRADE, A. S.; KLOCK, U. Characterization of fibrillated cellulose nanofilms obtained at different consistencies. **Sci. For.**, v. 44, n. 110, p. 361-372, 2016.

PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; SCATOLINO, M. V.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. Estabilidade térmica de painéis aglomerados de bagaço de canade-açúcar e madeira de *Pinus* spp. **Sci. For.**, v. 43, n. 107, p. 683-691, 2015.

RESETCO, C.; FRANK, D.; DIKIÉ, T.; CLAESSENS, S.; VERBRUGGE, T.; DU PREZ, F. E. Thiolactone-based polymers for formaldehyde scavenging coatings. **Eur. Polym. J.**, v. 82, p. 166-174, 2016.

RIOS, P. D'A.; PEREIRA, G. F.; VIEIRA, H. C.; GRUBERT, W.; CUNHA A. B.; BRAND, M. A. Avaliação do potencial da madeira de *Pinus patula* Schltdl. & Cham para a produção de painéis de madeira aglomerada. **Sci. For.**, v. 44, n. 110, p. 497-508, 2016.

ROJAS, J.; BEDOYA, M.; CIRO, Y. Current trends in the production of cellulose nanoparticles and nanocomposites for biomedical applications. In: POLETTO, M. (Ed.). **Cellulose – Fundamental aspects and Current Trends**. Rijeka: InTech Publisher, 2015. pp. 193-228.

RUDIE, A. W.; HART, P. W. The Bleaching of Pulp, 5th Ed. Peachtree Corners: TAPPI Press, 2012.

SAMYN, P.; BARHOUM, A.; ÖHLUND, T.; DUFRESNE, A. Review: nanoparticles and nanostructured materials in papermaking. **J. Mater. Sci.**, v. 53, n. 1, p. 146-184, 2018.

SCATOLINO, M. V.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Thermal stability of *Pinus oocarpa* and maize cob particleboards. **Ciênc. agrotec.**, v. 39, n. 4, p. 348-354, 2015.

SCORZA, D.; MARSAVINA, L.; CARPINTERI, A.; RONCHEI, C.; VANTADORI, S. Size-effect independence of particleboard fracture toughness. **Compos. Struct.**, v. 229, p. e111374, 2019.

SEHAQUI, H.; ALLAIS, M.; ZHOU, Q.; BERGLUND, L. A. Wood cellulose biocomposites with fibrous structures at micro- and nanoscale. **Compos. Sci. Technol.**, n. 71, p. 382-387, 2011.

SIDDIQUI, N.; MILLS, R. H.; GARDNER, D. J.; BOUSFIELD, D. Production and Characterization of Cellulose Nanofibers from Wood Pulp. **J. Adhes. Sci. Tech.**, v. 25, p. 709-721, 2012.

SILVA, D. J.; D'ALMEIDA, M. L. O. Cellulose whiskers. **O papel**, v. 70, n. 7, p. 34-52, 2009.

SILVA, D. W.; FARRAPO, C. L.; RIBEIRO, D. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; SCOLFORO, J. R. S. MDP com partículas de eucalipto e palha de milho. **Sci. For.**, v. 43, n. 108, p. 853-862, 2015.

SILVA, D. W.; SCATOLINO, M. V.; PRADO, N. R. T.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Addition of different proportions of castor husk and pine wood in particleboards. **Waste Biomass Valorization**, v. 9, p.139-145, 2018.

SIQUEIRA, G.; BRAS, J.; DUFRESNE, A. Cellulosic Bionanocomposites: A Review of Preparation, Properties and Applications. **Polymers**, v. 2, n. 4, p. 728-765, 2010.

SIRÓ, I.; PLACKETT, D. Microfibrillated cellulose and new composite materials: A review. **Cellulose**, v. 17, n. 3, p. 459-464, 2010.

SOARES, S. S.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; PROTÁSIO, T. P.; LISBOA, F. J. N. Valorização do bagaço de cana-de-açúcar na produção de painéis aglomerados de baixa densidade. **Braz. J. Wood Sci.**, v. 8, n. 2, p. 64-73, 2017.

SOLALA, I.; IGLESIAS, M. C.; PERESIN, M. S. On the potential of lignin-containing cellulose nanofibrils (LCNFs): a review on properties and applications. **Cellulose**, v. 27, p. 1853-1877, 2020.

SPENCE, K. L. **Processing and Properties of Microfibrillated Cellulose**. 2011. 269 p. Thesis (PhD in Forest Biomaterials) – North Carolina State University, Raleigh, 2011.

SPENCE, K. L.; VINDITTI, R. A.; ROJAS, O. J.; HABIBI, Y.; PAWLAK, J. J. The effect of chemical composition on microfibrillar cellulose films from wood pulps: water interactions and physical properties for packaging applications. **Cellulose**, v. 117, p. 835-848, 2010.

SYVERUD, K.; CHINGA-CARRASCO, G.; TOLEDO, J.; TOLEDO, P. G. A comparative study of *Eucalyptus* and *Pinus radiata* pulp fibres as raw materials for production of cellulose nanofibrils. **Carbohydr. Polym.**, v. 84, p. 1033-1038, 2011.

TARRÉS, Q.; BOUFI, S.; MUTJÉ, P.; DELGADO-AGUILAR, M. Enzymatically hydrolyzed and TEMPO-oxidized cellulose nanofibers for the production of nanopapers: morphological, optical, thermal and mechanical properties. **Cellulose**, v. 24, n. 9, p. 3943-3954, 2017.

THOMAS, B.; RAJ, M. C.; JOY, J.; MOORES, A.; DRISKO, G. L.; SANCHEZ, C. Nanocellulose, a versatile green platform: from biosources to materials and their applications. **Chem. Rev.**, v. 118, n. 24, p. 11575-11625, 2018.

TIBOLLA, H.; PELISSARI, F. M.; RODRIGUES, M. I.; MENEGALLI, F. C. Cellulose nanofibers produced from banana peel by enzymatic treatment: Study of process conditions. **Ind. Crop Prod.**, v. 95, p. 664-674, 2017.

TONOLI, G. H. D.; HOLTMAN, K. M.; GLENN, G.; FONSECA, A. S.; WOOD, D.; WILLIAMS, T.; SA, V. A.; TORRES, L.; KLAMSZYNSKI, A.; ORTS, W. J. Properties of cellulose micro/nanofibers obtained from eucalyptus pulp fiber treated with anaerobic digestate and high shear mixing. **Cellulose**, v. 23, n. 2, p. 1239-1256, 2016.

TRANSPARENCY MARKET RESEARCH. **Formaldehyde Market**. Albany, 2019. Disponível em: <<https://www.transparencymarketresearch.com/formaldehyde-market.html>>. Acesso em: 12 jun. 2020.

UMEMURA, K.; UEDA, T.; MUNAWAR, S. S.; KAWAI, S. Application of citric acid as natural adhesive for wood. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 123, n. 4, p. 1991-1996, 2012a.

VARANDA, L. D.; YAMAJI, F. M.; SANTOS, L. R. O.; SILVA, D. A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Physical performance of particleboards using Castor oil-based adhesive. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 22, n. 10, p. 707-712, 2018.

VEIGEL, S.; RATHKE, J.; WEIGL, M.; GINDL-ALTMUTTER, W. Particleboard and oriented strand board prepared with nanocellulose-reinforced adhesive. **J. Nanomater.**, v. 2012, p. e158503, 2012.

VENTURA, C.; PINTO, F.; LOURENÇO, A. F.; FERREIRA, P. J. T.; LOURO, H.; SILVA, M. J. On the toxicity of cellulose nanocrystals and nanofibrils in animal and cellular models. **Cellulose**, v. 27, p. 5509–5544, 2020.

VIANA, L. C. **Desenvolvimento de filmes celulósicos nanoestruturados a partir de fibras de *Pinus* sp.** 2013. 124 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

WANG, W.; MOZUCH, M. D.; SABO, R. C.; KERSTEN, P.; ZHU, J. Y.; JIN, Y. Production of cellulose nanofibrils from bleached eucalyptus fibers by hyperthermostable endoglucanase treatment and subsequent microfluidization. **Cellulose**, n. 22, v. 1, p. 351-361, 2015.

WEBER, C.; IWAKIRI, S. Utilização de resíduos de compensados, MDF e MDP para produção de painéis aglomerados. **Cienc. Florest.**, v. 25, n. 2, p. 405-413, 2015.

WEIGAND, L.; MOSTAME, S.; BRANDT-TALBOT, A.; WELTON, T.; HALLETT, J. P. Effect of pretreatment severity on the cellulose and lignin isolated from *Salix* using ionic liquid pretreatment. **Faraday Discuss.**, v. 202, p. 331-349, 2017.

WIDYORINI, R.; NUGRAHA, P. A.; RAHMAN, M. Z. A.; PRAYITNO, T. A. Bonding Ability of a New Adhesive Composed of Citric Acid-Sucrose for Particleboard. **BioResources**, v. 11, n. 2, p. 4526-4535, 2016.

XING, X.; XIAO, X.; WANG, L.; WANG, Y. Highly sensitive formaldehyde gas sensor based on hierarchically porous Ag-loaded ZnO heterojunction nanocomposites. **Sens. Actuators B Chem.**, v. 247, p. 797-806, 2017.

YANO, H.; NAKAGAITO, A. N. The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites. **Appl. Phys. A**, v. 78, n. 4, p. 547-552, 2004.

YE, X. P.; JULSON, J.; KUO, M.; WOMAC, A.; MYERS, D. Properties of medium density fiberboards made from renewable biomass. **Bioresour. Technol.**, v. 98, n. 5, p. 1077-1084, 2007.

ZHANG, J.; SONG, H.; LIN, L.; ZHUANG, J.; PANG, C.; LIU, S. Microfibrillated cellulose from bamboo pulp and its properties. **Biomass Bioenergy**, v. 39, p. 78-83, 2012.

ZHANG, J.; WANG, X.; ZHANG, S.; GAO, Q.; LI, J. Effects of melamine addition stage on the performance and curing behavior of melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin. **BioResources**, v. 8, n. 4, p. 5500-5514, 2013.

ZHANG, Z. J.; QIU, L. X.; CHEN, Y. Z.; LI, Z. H.; SONG, H. Y.; CHEN, Q. W. Effect of pulp concentration during cellulase pretreatment on microfibrillated cellulose and its film properties. **BioRes.**, v. 11, n. 3, p. 6540-6551, 2016.

ZHAO, L.-F.; LIU, Y.; XU, Z.-D.; ZHANG, Y.-Z.; ZHAO, F.; ZHANG, S.-B. State of research and trends in development of wood adhesives. **Forestry Studies in China**, v. 13, p. 321-326. 2011.

ZHAO, X.; ZHANG, L.; LIU, D. Biomass recalcitrance. Part II: Fundamentals of different pre-treatments to increase the enzymatic digestibility of lignocellulose. **Biofuels, Bioprod. Bioref.**, v. 6, n. 5, p. 561-579, 2012.

**SEGUNDA PARTE: ARTIGO****POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DE ADESIVO UREIA-FORMADEÍDO POR  
NANOCELULOSE EM PAINÉIS AGLOMERADOS****UREA-FORMALDEHYDE ADHESIVE REPLACEMENT POTENTIAL FOR  
NANOCELLULOSE IN AGGLOMERATED PANELS****RESUMO**

O objetivo deste estudo foi avaliar diferentes concentrações (0, 20, 40, 60 e 80 %) de nanofibrilas de celulose (NFC) em substituição ao adesivo ureia-formaldeído (UF) em painéis aglomerados. A polpa marrom de eucalipto foi utilizada como matéria-prima para a geração de NFC. A matéria-prima utilizada para a produção dos painéis (*Pinus oocarpa*) foi caracterizada quanto à densidade básica, composição química e morfologia. Para caracterização das misturas adesivas, foram determinados o teor de sólidos, pH, viscosidade, gel time e termogravimetria. Na produção dos painéis foram utilizados 2 % NFC, 10 % de composto adesivo e 1 % de parafina, em relação à massa seca das partículas, levando-se em consideração seu conteúdo de sólidos resinosos. O colchão de partículas formado foi submetido à pré-prensagem a frio com pressão de 1 MPa e, por fim, prensado a quente com pressão de 4 MPa com temperatura de 150 °C por um período de 15 minutos. Foram avaliadas as propriedades dos painéis: densidade aparente, razão de compactação, teor de umidade, absorção de água e inchamento em espessura (2 e 24 horas), flexão estática (MOE e MOR) e tração perpendicular (TP). Foi verificado que o aumento de nanofibrilas adicionado ao painel promoveu redução nas propriedades do adesivo (teor de sólidos, pH, viscosidade, gel time), além de promover a redução da estabilidade térmica dos mesmos. As propriedades densidade aparente, teor de umidade, inchamento em espessura, flexão estática e tração perpendicular atenderam os requisitos mínimos determinados pela norma ANSI A208.1 (2009). Pode-se afirmar, que é possível produzir painéis aglomerados com nanofibrilas de celulose na proporção de até 31 % o que demonstra o potencial desse adesivo natural, renovável e não tóxico ao meio ambiente.

**Palavras-chave:** Ensaios físicos. Ensaios mecânicos. Nanofibrilas de celulose. Nanomaterial.

## ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the cellulose nanofibrils (NFC) different concentrations (0, 20, 40, 60 and 80%) replacement the urea-formaldehyde (UF) adhesive in the production of particleboards. The eucalyptus brown kraft pulp was used as a raw material for the generation of NFC. For this, the mechanical defibrillation process was used to transform this material into nanoparticles. The raw material used to produce the panels (*Pinus oocarpa*) was characterized in terms of basic density, chemical composition, and morphology. The solids content, pH, viscosity, time gel and thermogravimetry were determined to characterize the adhesive mixtures. In the production of the panels, 2% NFC, 10% adhesive compound and 1% paraffin were used, in relation to the dry mass of the particles, considering their content of resinous solids. The particle mattress formed was subjected to cold pre-pressing at a pressure of 1 MPa and, finally, hot pressing at a pressure of 4 MPa at a temperature of 150 °C for a period of 15 minutes. The apparent density, compaction ratio, moisture content, water absorption and thickness swelling (2 and 24 hours), static flexion (MOE and MOR) and perpendicular traction (TP) properties of the panels were evaluated. It was verified that the increase of nanofibrils added to the panel promoted a reduction in the adhesive properties (solids content, pH, viscosity, gel time), in addition to promoting a reduction in their thermal stability. The apparent density, moisture content, thickness swelling, static flexion and perpendicular tensile properties met the minimum requirements determined by ANSI A208.1 (2009). The results obtained indicates the using up to 31% of the cellulose nanofibrils in the production of agglomerated panels technical feasibility, demonstrating the great potential of this natural, renewable and non-toxic adhesive to the environment great potential.

**Keywords:** Adhesive. Particleboards. Nanocellulose, Nanotechnology.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas indústrias de painéis de madeira, o aglomerado é o produto mais produzido e consumido no mundo (MAHRDT et al., 2016; GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2019). Os painéis aglomerados são fabricados de partículas de madeira e unidas com ligação adesiva formam uma camada homogênea por meio da ação de pressão e temperatura. Eles são utilizados, principalmente, em ambientes internos, como na indústria de móveis, bem como para isolamento térmico e acústico (GHANI et al., 2018; MESQUITA et al., 2018).

O adesivo ureia-formaldeído (UF) é o principal adesivo utilizado em painéis aglomerados, pois oferece muitas vantagens em aplicações industriais, como alta reatividade, incolor, ao baixa custo em comparação aos outros adesivos sintéticos e facilidade de processamento (MAHRDT et al., 2015; MANTANIS et al., 2018). Apesar desses atributos positivos, apresentam desvantagens como ser proveniente de fontes não renováveis, à suscetibilidade à umidade e ainda emitir grande quantidade de formaldeído que são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente (STOECKEL; KONNERTH; GINDL-ALTMUTTER, 2013; NAKANISHI et al., 2018; MOSLEMI et al., 2020).

Devido ao risco do formaldeído para a saúde humana e ao meio ambiente, várias pesquisas vêm sendo realizadas para minimizar esses efeitos, principalmente no que tange a incorporação de polímeros ecológicos aos adesivos com o propósito de melhorar suas propriedades e o desempenho na colagem. Dessa forma, a utilização da nanotecnologia se apresenta como uma oportunidade para indústria de painéis de madeira, a fim de desenvolver adesivos seguros, ecológicos e com alto desempenho (KABOORANI; RIEDL, 2011; ROUMELI et al., 2012; CANDAN; AKBULUT, 2013; MAHRDT et al., 2016).

Neste contexto, destaca-se a nanocelulose, biopolímero natural, abundante e de baixo custo surge como uma opção viável (THOMAS et al., 2018). A nanocelulose é um produto derivado da celulose que tem como característica o diâmetro menor que 100 nm e vários micrômetros de comprimento (PHANTHONG et al., 2018; LENGOWSKI et al., 2019). É obtida a partir de diferentes tipos de fontes, tais como: algas, bactérias e plantas (ESKILSON et al., 2020). Esse nanomaterial quando adicionado promove excelentes propriedades como alta área de superfície, alta rigidez e resistência (GARDNER et al., 2008; VEIGEL et al., 2012) podendo ser aplicados em diferentes ramos da indústria como: farmacêutica, alimentícia, papel, compósito, painéis de madeira (SIRÓ; PLACKETT, 2010; BRINCHI et al., 2013; KHALIL et al., 2014; MAHRDT et al. 2016), construção civil e em produtos eletrônicos (KALIA et al., 2011).



Recentemente, estudos demonstraram que a incorporação de nanocelulose em painéis de madeira pode promover a melhoria do desempenho das ligações adesivas. Zhang et al. (2012), produzindo nanocristais de celulose (CNC) modificados com aminopropiltriétoxissilano (APTES) em mistura com adesivo UF, observaram redução de 13% de emissão de formaldeído com adesivos modificados com 1% de nanocristais. Justificado pelos altos níveis de grupos hidroxilas que esse material apresenta podem reagir com os grupos ativos da ureia-formaldeído e desta forma promover a redução desses gases (KHANJANZADEH et al., 2019).

Já no estudo de Diop et al. (2017) mostraram que a NFC pode substituir totalmente o uso de adesivo comerciais. Segundo os autores, a NFC promove aumento da capacidade de ligação entre fibras de madeira além de preencher espaços vazios entre essas partículas e proporcionar maior ligação entre elas. Moslemi et al. (2020) avaliaram aumento das propriedades mecânicas MOR e MOE de painéis MDF com o incremento de NFC, atribuindo esse fato ao aumento da interação do adesivo/madeira e eliminação de espaços vazios na superfície das fibras de madeira pela adição de NFC. Os autores acreditam que esse fato pode estar também ligado a melhor transferência de tensão do adesivo para a NFC. Os autores também observaram redução na emissão de formaldeído variando de 12 a 24% com a incorporação dessas nanoestruturas ao painel.

Ainda outros estudos apontam que uma quantidade considerável de lignina contida na nanocelulose oferece várias vantagens (MORALES et al., 2014; CHEN et al., 2019). Uma destas vantagens é a redução dos custos no pré-tratamento da polpa, devido a não utilização do pré-tratamento da polpa pelo processo de branqueamento (OSONG; NORGREN; ENGSTRAND, 2013). Outra vantagem é sua alta reatividade quando incorporada aos adesivos sintéticos, visto que a lignina contém grande quantidade de grupos OH primários (CHEN, 1992).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados substituindo-se parcialmente o adesivo à base de uréia-formaldeído por nanocelulose.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Materiais lignocelulósicos e suas características**

A pesquisa foi desenvolvida na Unidade Experimental de Painéis de Madeira (UEPAM) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Para a produção dos painéis foram utilizadas três

árvores de *Pinus oocarpa* com idade de 32 anos, oriundas de plantio experimental com espaçamento inicial de 3 x 2 m instalado na UFLA (21° 14' S 44° 5' W), Lavras, Minas Gerais.

Após o abate das três árvores de *P oocarpa*, estas foram seccionadas em toretes sendo também retirados discos para a determinação da densidade básica da madeira de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003). Os toretes com 58 cm de comprimento foram encaminhados para Unidade Experimental de Painéis de Madeira da Universidade Federal de Lavras e colocados imersos em tanque com água com temperatura de 85 °C por um período de 48 horas. Logo, os toretes foram então fatiados em um torno laminador produzindo lâminas de madeira com uma espessura nominal de 2 mm e, em seguida, secas em estufa a  $105 \pm 2$  °C por 24 h até a umidade na base seca de 3%. Após a secagem, as lâminas passaram por um moinho do tipo martelo com peneira de abertura de 10 mm para a geração das partículas do tipo “sliver”. O material utilizado foi aquele que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na de 60 mesh. Após a obtenção destas partículas, foram retiradas amostras para determinação da caracterização química e morfológica.

Para a caracterização química, quantificou-se os extrativos totais de acordo com a norma NBR 14853 (ABNT, 2010), teor de lignina insolúvel conforme NBR 7989 (ABNT, 2010), cinzas segundo a NBR 13999 (ABNT, 2017) e a holocelulose (obtida pela diferença  $H (\%) = 100 - \% \text{ Extrativos totais} - \% \text{ Lignina insolúvel} - \% \text{ Cinzas}$ ). Na mensuração das partículas lignocelulósicas, foram selecionadas, ao acaso, 30 amostras, obtendo informações como comprimento, largura e espessura, as quais foram realizadas utilizando o Software ImageJ. O índice de esbeltez foi obtido pela razão entre o comprimento e o diâmetro. Todas as caracterizações foram realizadas em triplicata.

Outro material utilizado neste estudo foi a polpa *kraft* marrom de eucalipto doada pela empresa Klabin S.A (Paraná, Brasil). A suspensão de nanocelulose foi obtida a partir dessa polpa *kraft* marrom de eucalipto na consistência de 2% em massa. Para isso, 120 g das fibras alcalinas e fibras não alcalinas foram imersas em 6 L de água destilada durante três dias com o propósito de garantir o intumescimento das fibras. A polpa não passou por nenhum tratamento antes da desfibrilação. As fibras foram submetidas à nanofibrilação por meio de um desfibrilador Super MassColloider (Masuko Sangyo MKCA6-2) composto por dois discos de pedra (MKGA6-80) a 1.500 rpm com 30 ciclos através do moedor (TONOLI et al., 2012; FONSECA et al., 2013; BUFALINO et al., 2015; GUIMARÃES JUNIOR et al., 2015; SCATOLINO et al., 2017a).

## 2.2 Caracterização morfológica das nanofibrilas de celulose

A caracterização das dimensões das nanofibrilas foi realizada por meio da microscopia eletrônica de transmissão (MET). Sendo utilizado para a caracterização das NFC o microscópio Tecnai G2-12, com voltagem de 80 kv. Para o preparo das amostras foram seguidos os procedimentos descritos por Tonoli et al. (2012). Para isso foi adicionado acetato de uranila à suspensão que continha as nanoestruturas visando melhorar o contraste.

Posteriormente, as suspensões juntamente com o corante foram adicionadas em grinder de cobre (400 mesh) com filme *formvar* (adesivo termoplástica), sendo seca em seguida para ser analisada no MET. Para a determinação do diâmetro das NFC foi utilizado o software ImageJ, no qual as dimensões foram mensuradas utilizando-se a ferramenta *measure*.

## 2.3 Preparação e caracterização dos adesivos (UF-NFC)

As misturas de adesivos UF foram preparadas com solução a 2% de NFC em concentrações de 20, 40, 60 e 80% com base no teor de sólidos do adesivo UF. O adesivo preenchido com celulose foi misturado em um agitador magnético por aproximadamente 10 minutos até alcançar uma distribuição homogênea dos adesivos. Posteriormente, foram caracterizados a viscosidade de acordo com a norma D1200-10 (ASTM, 2018), o teor de sólidos conforme D1582-60 (ASTM, 1994), o pH segundo E70-07 (ASTM, 2015) e o tempo de gelatinização D2471-99 (ASTM, 1999). Todos os procedimentos foram realizados em triplicadas para cada tratamento, sendo obtidas suas respectivas médias.

A caracterização térmica dos adesivos foi realizada por meio de um analisador térmico TGA Q500 (TA Instruments<sup>®</sup>) nas seguintes condições: intervalo de temperatura entre 30 a 800 °C, taxa de aquecimento de 25 °C/minuto e em ambiente inerte de nitrogênio gasoso fluindo a 50 mL minuto<sup>-1</sup>. Para identificação dos picos característicos de degradação térmica das amostras foi utilizada a primeira derivada da curva de termogravimetria (TGA), que estabelece a perda de massa em função da temperatura. O percentual de resíduos foi obtido pelo ponto final da curva de termogravimetria, enquanto a temperatura de degradação máxima ( $T_{max}$ ) foi obtida com base nos picos observados nas curvas de termogravimetria derivada (DTG). Esta análise foi efetuada na Central de Análise e Prospecção Química da Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

## 2.4 Produção e caracterização dos painéis aglomerados

As partículas de madeira e suspensão de NFC foram dispostas em uma bandeja em que se procedeu a sua mistura até ocorrer a homogeneização do material. Posteriormente, foram levados para estufa a uma temperatura de  $103 \pm 2$  °C por um período de 24 horas até atingir um teor de umidade de 4% na base seca. Os painéis foram produzidos em substituição em massa do adesivo UF por NFC nas seguintes proporções (0, 20, 40, 40, 60 e 80%), conforme observado na Tabela 1. A massa de NFC utilizada em cada tratamento foi calculada com base em sua consistência de 2%. Além disso, foi aplicado 10% de composto adesivo e 1% de parafina, respectivamente, em relação à base seca das partículas, levando-se em consideração seu conteúdo de sólidos resinosos.

Na sequência, o adesivo UF foi misturado com as partículas de madeira, suspensão de NFC e parafina de forma manual. O colchão de partículas formado foi submetido à prensagem hidráulica a frio de 1 MPa, e logo, prensado a quente com temperatura de 150 °C e pressão específica de 4 MPa por um período de 15 minutos, obtendo-se assim os painéis aglomerados.

Após a prensagem, os painéis foram acondicionados em uma sala de climatização com temperatura de  $20 \pm 2$  °C e umidade de  $65 \pm 3\%$  até atingirem massa constante. Posteriormente, os corpos de prova foram retirados com o auxílio de uma serra circular, para realização dos testes físicos e mecânicos. Na Tabela 2 estão descritos os testes e as normas utilizadas neste trabalho para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Tabela 1 – Plano experimental dos painéis aglomerados.

<b>Tratamentos</b>	<b>UF (%)</b>	<b>NFC (%)</b>
T1	100	0
T2	80	20
T3	60	40
T4	40	60
T5	20	80

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 2 – Determinação das propriedades físicas e mecânicas.

<b>Propriedades</b>	<b>Normas</b>
Densidade aparente	ANSI A208.1 (2009)
Teor de umidade	ANSI A208.1 (2009)
Absorção de água após 2 e 24 horas em imersão	ASTM D1037 (2012)
Inchamento em espessura após 2 e 24 horas em imersão	ASTM D1037 (2012)
Flexão estática – Módulo de elasticidade (MOE)	ANSI A208.1 (2009)
Flexão estática – Módulo de ruptura (MOR)	ANSI A208.1 (2009)
Tração perpendicular (TP)	ANSI A208.1 (2009)

Fonte: Do autor (2021).

## 2.5 Caracterização microestrutural (MEV)

A caracterização microestrutural dos painéis foi realizada por meio de um microscópio eletrônico de varredura modelo LEO EVO 40 XVP Zeiss, localizado no Departamento de Fitopatologia da UFLA. O preparo e análise das amostras foram realizados nas regiões de fratura no ensaio de flexão, com o propósito de avaliar a interação das partículas-madeira-adesivos. Para isso, foram utilizadas amostras da linha de cola com dimensões de 1 cm<sup>3</sup>, que foram secas por 24 horas em estufa de circulação de ar com temperatura de 105 °C. Para isso, as amostras foram fixadas sobre o porta-amostras de alumínio (*stubs*) e recobertas com ouro.

## 2.6 Análise estatística

O experimento foi conduzido em um delineamento inteiramente casualizado (DIC) com 3 repetições para cada tratamento. Para avaliação das propriedades físico-mecânicas dos painéis, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) por meio da qual foi verificada a significância dos efeitos dos tratamentos pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Como os níveis dos tratamentos são quantitativos, procedeu-se a análise de regressão quando necessário (valor  $p < 0,05$ ).

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 3.1 Caracterização do material lignocelulósico

A densidade básica encontrada para a madeira de *P. oocarpa* foi de  $0,48 \pm 0,02$  g cm<sup>-3</sup>. Scatolino et al. (2013), ao produzirem painéis aglomerados com diferentes porcentagens de sabugo de milho associadas com partículas de madeira de *P. oocarpa*, obtiveram para o pinus valor médio de  $0,47$  g cm<sup>-3</sup>, mesmo valor encontrado por Pinati et al. (2018). Já no estudo realizado por Mendes et al. (2018) obtiveram resultados variando entre  $0,43$  e  $0,59$  g cm<sup>-3</sup> para a mesma espécie, conforme diferentes posições da árvore. Enquanto Andrade et al. (2019), ao avaliarem o efeito da utilização de resíduos UKP em associação a madeira de *P. oocarpa* na produção de painéis MDP, encontraram valor médio de densidade básica de  $0,45 \pm 0,01$  g cm<sup>-3</sup> para madeira de *P. oocarpa*. O valor obtido nesse estudo se mostrou semelhante aos valores encontrados na literatura.

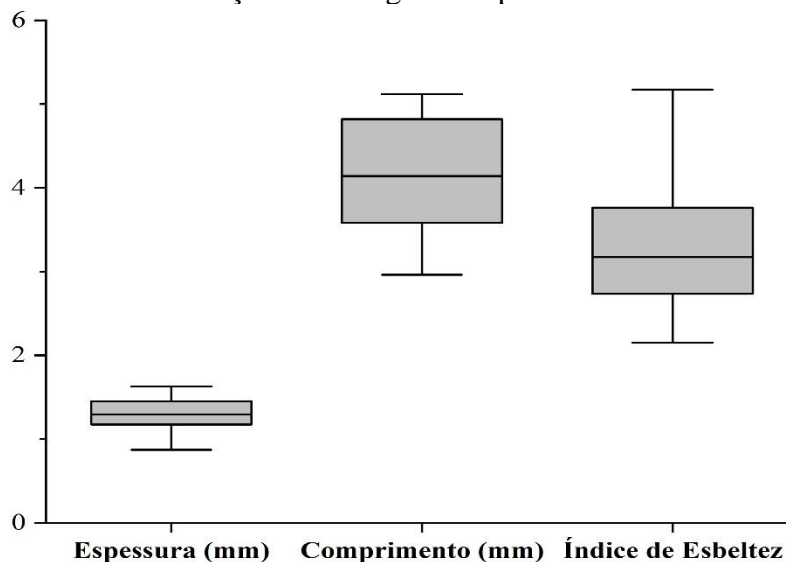
Segundo Coradin et al. (2010) e Silveira, Rezende e Vale (2013), os autores classificam madeiras de baixa densidade aquelas que apresentam valores abaixo de  $0,55 \text{ g cm}^{-3}$ , média densidade entre  $0,55$  e  $0,72 \text{ g cm}^{-3}$  e de alta densidade aquelas com valores superiores a  $0,73 \text{ g cm}^{-3}$ . Dessa forma, a madeira objeto deste estudo pode ser classificada como madeira de baixa densidade.

De acordo com Bufalino et al. (2012) e Scatolino et al. (2017b), a utilização de madeiras de baixa densidade pode proporcionar uma maior razão de compactação e resultar em melhoria das propriedades mecânicas dos painéis. Logo, partículas menos densas são mais desejadas pelo fato de proporcionar uma melhor adesão entre as partículas, visto que promovem melhores propriedades de resistência à flexão estática, adesão interna e módulo de elasticidade (IWAKIRI et al., 2012b; IWAKIRI et al., 2012c).

### 3.2 Caracterização morfológica das partículas

Os valores referentes à caracterização morfológica do material lignocelulósico estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Caracterização morfológica das partículas de *Pinus oocarpa*.



Fonte: Do autor (2021).

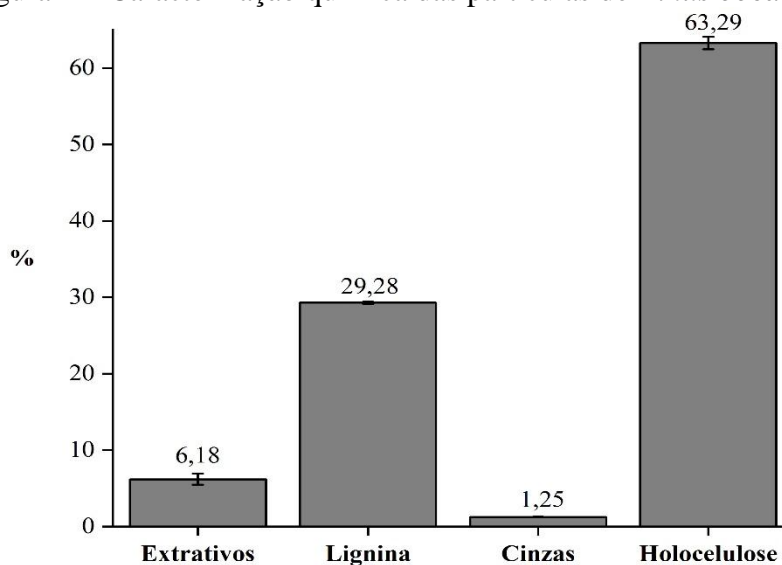
Observa-se na Figura 1 que os valores encontrados para as partículas de *Pinus oocarpa* apresentaram comprimento médio de 4,41 mm, sendo o valor máximo 5,86 mm e valor mínimo de 2,96 mm. Em relação à espessura, as partículas possuem valor médio de 1,25 mm, sendo o valor máximo de 1,63 mm e valor mínimo de 0,87 mm (FIGURA 1).

Em relação ao índice de esbeltez, o valor encontrado neste trabalho (3,49) é semelhante ao relatado por Narciso (2018), que avaliou partículas de madeira de *P. oocarpa* e obteve valor médio de 3,96 mm de comprimento, 1,27 mm de espessura e 3,16 para o índice de esbeltez. Irle e Barbu (2010) e Araujo et al. (2019) reiteram que a geometria das partículas pode influenciar diretamente no desempenho final do painel, em que partículas com comprimentos maiores são capazes de gerar boas qualidades mecânicas ao painel, enquanto as partículas com comprimentos menores apresentam uma melhor qualidade superficial, maior dureza e ligação interna. Ressalta-se que, um alto coeficiente de esbeltez além de promover maior resistência mecânica, confere maior estabilidade dimensional aos painéis (IWAKIRI et al., 2005).

### 3.3 Caracterização química das partículas

Os valores médios referentes à caracterização química das partículas de madeira de *P. oocarpa* estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Caracterização química das partículas de *Pinus oocarpa*.



Fonte: Do autor (2021).

Verifica-se que a composição química das partículas de *P. oocarpa* foi de 6,18% de extrativos, 29,28% de lignina, 1,25% de cinzas e 63,29% para teor de holocelulose. Pinati et al. (2018), ao estudarem os constituintes químicos da madeira de *P. oocarpa*, obtiveram teores de extrativos totais de 4,03%, 26,08% de lignina, 0,26% de cinzas e 69,63% de holocelulose. Teodoro et al. (2015) avaliaram a mesma espécie, sendo relatado valores médios para o teor de extrativos de 5,20%, lignina de 28,30%, cinzas de 0,40% e holocelulose de 66,20%. Em estudo feito por Andrade et al. (2019), os autores avaliaram os componentes químicos da madeira de

*P. oocarpa* com idade de 28 anos e encontraram valor médio de extrativos totais de 4,72%, lignina 31,32%, 0,20% cinzas e holocelulose 63,71%.

Observa-se na Figura 2 que o teor de extrativos do presente estudo apresentou maior valor médio em relação aos obtidos na literatura. Ressalta-se que, quando presente em quantidade elevada, o teor de extrativos pode comprometer a cura do adesivo e por consequência, bloquear a interação madeira-adesivo causando deficiência na colagem dos painéis (IWAKIRI et al., 2012a). Segundo Trianoski (2010), a alta quantidade de extrativos pode também interferir nos processos de acabamentos dos painéis, quando se aplica vernizes e tintas à base de água levando a formação de manchas no produto final. Ademais, espécies com elevado teor de extrativos são propensas a estouros no final do ciclo de prensagem (CLOUTIER, 1998).

As madeiras de coníferas possuem teores de lignina de  $28 \pm 2\%$  (FENGEL; WEGENER, 1989). No presente estudo o *P. oocarpa* com teor de 29,28%, situa-se dentro dessa faixa especificada. Bufalino et al. (2012) afirmam que a lignina é um adesivo natural e, portanto, um maior percentual de lignina é desejável para a produção de painéis aglomerados.

Quanto ao teor de cinzas, o presente estudo foi superior ao encontrado na literatura. Altas quantidades de cinzas são indesejáveis nos painéis, visto que podem afetar o pH do material e interferir negativamente na ligação adesiva entre as partículas (SOARES et al., 2017). Contudo, essas variações entre os teores obtidos na literatura e os encontrados neste trabalho, provavelmente, estão relacionados ao local de plantio, solo, idade e manejo adotado.

Em relação ao teor de holocelulose, os valores encontrados foram semelhantes aos relatados em literatura para *P. oocarpa* (TEODORO et al., 2015; PINATI et al., 2018; ANDRADE et al., 2019). Fiorelli et al. (2018) afirmam que a holocelulose (celulose + hemiceluloses) são as maiores responsáveis por essa propriedade e, em altas quantidades indicam maior higroscopicidade da madeira.

### **3.4 Caracterização dos adesivos com adição de NFC**

Na tabela 3 estão descritos os valores médios da caracterização dos adesivos sintéticos com e sem adição de NFC. Observa-se na Tabela 3 que houve redução do teor de sólidos à medida que aumentou a adição de NFC. Este fato pode ser atribuído ao comportamento hidrofílico das nanofibrilas, pois um alto teor de água pode causar a redução na taxa de cura do adesivo UF contendo NFC e reduzir assim o tempo de gel (YE et al., 2013; TAN et al., 2016; PARK et al., 2017).



Khanjanzadeh et al. (2019) ao avaliarem painéis de fibra de média densidade produzidos com adesivos UF reforçados com CNC em diferentes proporções (0, 0,5, 1, 1,5 e 2%), obtiveram valores de teor de sólidos 64,1, 61,3, 59,3, 56,3 e 54,9%, respectivamente. As tendências observadas pelos autores foram condizentes aos encontrados no presente trabalho.

Outro fator que interfere no processo da interação entre o sistema madeira-adesivo-madeira é o pH do adesivo e o pH da madeira, pois uma mudança nessa variável pode influenciar na solidificação da linha de cola (DAMÁSIO et al., 2017; SILVA et al., 2019). Normalmente, a cura do adesivo (UF) é acelerada à medida que o pH é diminuído (SANTIAGO et al., 2018), sendo essa aceleração ocasionada pela presença de carga superficial ácida adquirida durante o processo de obtenção desse tipo de nanocelulose (CARDOSO et al., 2016). Para Wang et al. (2010), Carvalho et al. (2016) e Wang et al. (2016), o adesivo deve apresentar valores de pH variando entre 2,5 e 11,0, pois valores de pH abaixo e acima deste intervalo, respectivamente, podem provocar a formação de espuma na mistura e causar degradação das fibras da madeira em contato na área de adesão, prejudicando a colagem. Desta forma, todos os tratamentos realizados nesse estudo ficaram dentro dos valores considerados ideais pelos autores.

Tabela 3 – Valores médios de teor de sólidos, pH, viscosidade e gel time dos adesivos.

<b>Tratamento</b>	<b>Teor de sólidos (%)</b>	<b>pH</b>	<b>Viscosidade (cP)</b>	<b>Gel time (s)</b>
T1	65,32 ± 5,71 a	9,28 ± 0,02 a	1012,92 ± 167,84 a	805 ± 54,69 a
T2	5,47 ± 0,98 b	7,71 ± 0,02 b	448,53 ± 29,47 b	324 ± 50,03 b
T3	3,16 ± 0,42 c	6,29 ± 0,02 c	201,90 ± 3,95 c	247 ± 25,11 c
T4	2,53 ± 0,48 c	6,28 ± 0,02 c	204,46 ± 16,77 c	184 ± 10,58 d
T5	1,28 ± 0,59 d	6,26 ± 0,03 c	183,05 ± 29,81 c	165 ± 6,00 d

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott, a um nível de significância de 5%. Valores indicam a média e o desvio padrão.

Fonte: Do autor (2021).

Em relação à viscosidade dos adesivos foi observado uma diminuição significativa com o incremento de NFC ao adesivo UF. O maior valor de viscosidade foi para o adesivo UF controle, o que condiz com as expectativas, visto que essa tendência de baixa pode estar relacionada com a incorporação de água ao sistema como parte da formulação da nanocelulose (KHANJANZADEH et al., 2019). Associado a isso, a NFC possui muitos grupos hidroxilas livres que exercem uma força de atração entre as moléculas do fluido, o que pode ter influenciado na viscosidade (LENGOWSKI et al., 2020).

Comportamento semelhante foi relatado por Moslemi et al. (2020) que investigaram o efeito da adição de nanofibrilas de celulose (CNF) em painéis de fibra de média densidade. Eles aplicaram o CNF no adesivo UF em diferentes proporções (0, 0,5, 1,5 e 2%). Esses autores encontraram valores de viscosidade variando de 340 a 250 (MPa.s.), enquanto o observado neste estudo variou de 1012 a 183 (cP). No entanto, essa diferença entre os resultados observados por esses autores em relação ao presente estudo pode estar na quantidade de nanopartículas adicionadas ao adesivo, uma vez que no presente estudo utilizou maiores quantidades de nanofibrilas, promovendo de forma mais significativa a diminuição da viscosidade.

De acordo com Mendoza et al. (2017) e Araujo et al. (2019), o adesivo UF apresenta viscosidade entre 400 e 1000 cP. No entanto, deve-se atentar que valores muito baixos de viscosidade podem ocasionar uma maior penetração do adesivo na madeira, resultando em uma linha de cola “faminta”, o que prejudica o desempenho do adesivo em relação à colagem (PIZZI; MITTAL, 2018). Assim, apenas os tratamentos sem adição de NFC e com adição de 20% de NFC se enquadram na faixa de viscosidade recomendável para aplicação.

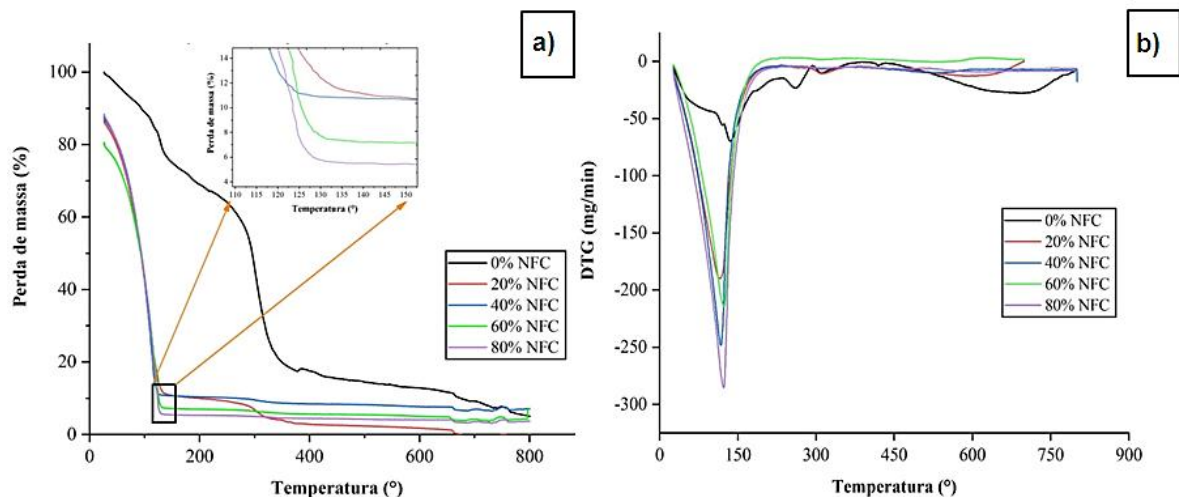
Conforme mencionado anteriormente, a redução do tempo de gel pode estar relacionada ao incremento de um teor de água após a incorporação de NFC (MOSLEMI et al., 2020), o que causa interferência na reatividade da mistura adesiva. Segundo Lengowski et al. (2020), o “*gel time*” corresponde a velocidade de polimerização do adesivo, e quanto maior a velocidade de reação, maior será a produtividade industrial e menor o custo energético no processo. Entretanto, ressalta-se que esse tempo não pode ser muito curto, visto que pode ocorrer a pré-cura do adesivo antes que ele realize as suas funções de movimento e mobilidade (BOSCHETTI, 2017).

### **3.5 Comportamento térmico dos adesivos**

O incremento de NFC ao adesivo UF pode acarretar alterações nas propriedades térmicas, sendo a avaliação dessa propriedade de extrema importância, pois possibilita identificar a temperatura máxima na qual se pode trabalhar, sem que haja degradação. Nesse sentido, as curvas TGA e DTG estão representadas na Figura 3. Na curva de TG é possível observar três picos de decomposição térmica para o adesivo UF controle e UF com adição de 20% de NFC. Observa-se também que à medida que se aumenta quantidade de NFC ao adesivo UF tem-se uma redução nesse número de picos (FIGURA 3a).

A primeira perda de massa está relacionada à perda de umidade e de formaldeído livre (KNOP; MEIER; PEZZIN, 2014), sendo que esse formaldeído livre provavelmente oriundo de diferentes componentes do adesivo como hemiformais e metilóis (MYERS, 1986). Nesta etapa a maior perda de massa (81,24%) foi observada quando se adiciona uma maior quantidade de nanofibrila ao painel (TABELA 4). Esse fato já era esperado, uma vez que pode estar relacionado com a incorporação de água ao sistema como parte da formulação da nanocelulose, mostrando-se desta forma, que o adesivo UF controle foi mais resistente à degradação térmica nestas temperaturas.

Figura 3 – Comportamento térmico dos diferentes tratamentos avaliados.



Legenda: Curvas de TGA (a) e (b) DTG do adesivo UF controle e UF misturado com adições de 20, 40, 60 e 80% de nanofibrilas de celulose.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 4 – Parâmetros característicos de cada estágio de degradação térmica dos diferentes tratamentos.

Tratamentos	Estágio I	Estágio II	Estágio III	Resíduos (%)
	Perda de massa (%)	Perda de massa (%)	Perda de massa (%)	
T1	22,00	59,00	14,00	5,00
T2	73,96	7,45	4,00	0,50
T3	72,53	8,10	0,00	6,96
T4	71,80	4,55	0,00	4,16
T5	81,24	3,57	0,00	3,70

Fonte: Do autor (2021).

O contrário ocorreu com os adesivos UF com adição de NFC em sua constituição, os quais apresentaram menores perdas. Esse fato pode ser explicado, pois as maiores perdas de massa nestes tratamentos ocorreram já nas primeiras horas (1º pico de degradação). Além disso,

essa perda de massa ocorre principalmente devido à decomposição do adesivo UF. Esse processo ocorre em temperatura de aproximadamente 250 °C (SHAHABUDIN; YAHYA; GAN, 2016) e continua a ocorrer até 800 °C com perda de 14% para UF controle e 4% UF misturado com 20% de NFC.

Na análise térmica para os diferentes tratamentos foi observado o pico de decomposição nas curvas de DTG em 133, 95, 89, 96 e 91 °C, para o adesivo UF controle e UF com adição de 20, 40, 60 e 80% de NFC, respectivamente. De forma geral, o adesivo UF controle apresentou picos de degradação máximos quando comparado ao adesivo UF com adição de NFC demonstrando maior estabilidade térmica.

Para a formação de resíduos, observa-se que os adesivos UF com adição de 20 e 40 % de NFC em sua constituição foram os tratamentos que apresentaram menor e maior geração de resíduo, respectivamente. Porém, com exceção do tratamento com 20 % de NFC, foi observado que a incorporação de nanoestruturas pouco alterou a formação de resíduo quando comparadas ao adesivo UF controle.

### **3.6 Caracterização dos painéis**

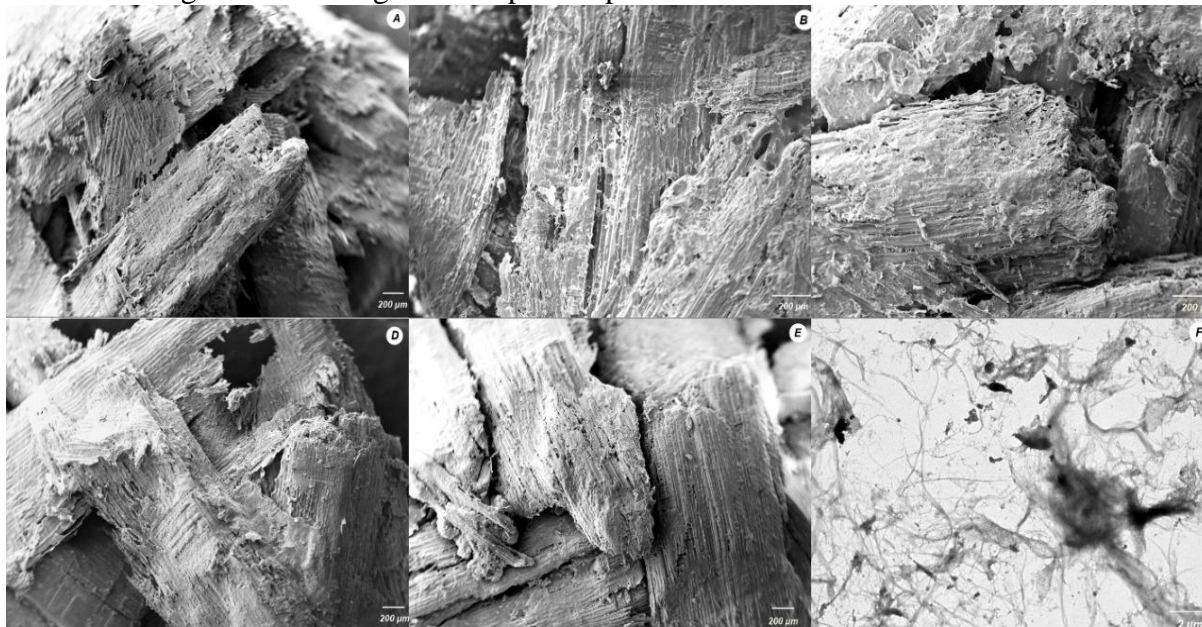
#### **3.6.1 Avaliação da interface madeira-adesivo (MEV)**

As observações por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para todos os 5 tratamentos são mostrados na Figura 4. Pode-se observar que o aumento na concentração de NFC nos painéis proporcionou uma superfície mais lisa, com menor rugosidade, o que corrobora com o observado por Hansted et al. (2019), que observou o mesmo comportamento com incremento de nanowhiskers utilizando painéis aglomerados de média densidade. Essa alteração quanto a distribuição do adesivo na superfície da fibra pode estar ligada a menor viscosidade do adesivo ocasionado pelo incremento da NFC (TABELA 3), que consequentemente promove maior penetração deste na madeira.

Verificou também menores quantidades de espaços vazios, que provavelmente foram preenchidos pela NFC. De acordo com Hansted et al. (2019), uma superfície mais lisa e com menor irregularidade pode prejudicar a qualidade da colagem e consequentemente prejudicar as propriedades mecânicas dos painéis. Fato esse que foi verificado também neste estudo, uma diminuição nas propriedades mecânicas à medida que se aumenta a quantidade de nanomaterial aos painéis de madeira. De acordo com Syverud et al. (2011), reitera que NFC apresentam diâmetro menor que 100 nm. Neste estudo foi observado que as NFC apresentaram diâmetro

médio de aproximadamente 29,62 nm, o que mostra que o processo de desfibrilação foi efetivo quanto a geração NFC.

Figura 4 – Micrografia dos painéis produzidos com adesivo UF e NFC.



Legenda: (A) Painéis com 100% de UF; (B) Painéis com 20 % de NFC (C) Painéis com 40% de NFC; (D) Painéis com 60% de NFC; (E) Painéis com 80% de NFC; e (F) Morfologia das NFC.

Fonte: Do autor (2021).

### 3.6.2 Propriedades físicas

Na Tabela 5, estão apresentados os valores médios de densidade aparente, razão de compactação e teor de umidade dos painéis aglomerados obtidos para os tratamentos analisados.

Tabela 5 – Valores médios de densidade aparente, razão de compactação e teor de umidade dos painéis aglomerados.

<b>Tratamentos (%)</b>	<b>DA (g cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>RC</b>	<b>TU (%)</b>
T1	0,78 ± 0,01 a	1,27 ± 0,01 a	4,77 ± 0,56 a
T2	0,78 ± 0,01 a	1,27 ± 0,02 a	4,34 ± 1,22 a
T3	0,77 ± 0,02 a	1,26 ± 0,02 a	4,59 ± 1,07 a
T4	0,74 ± 0,05 a	1,24 ± 0,02 a	3,81 ± 0,40 a
T5	0,76 ± 0,03 a	1,22 ± 0,04 a	6,63 ± 1,11 b

Legenda: DA = Densidade aparente; RC = Razão de compactação; TU = Teor de umidade. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott, a um nível de significância de 5%. Valores indicam a média e o desvio padrão.

Fonte: Do autor (2021).

Para a variável densidade aparente, não houve efeito significativo da adição de diferentes porcentagens de NFC nos painéis aglomerados (Tabela 5). Em todos os tratamentos

foi observado que a densidade aparente foi inferior a densidade nominal. Provavelmente, esse fato pode ser explicado devido as perdas das partículas durante o processo de produção manual dos painéis em laboratório, principalmente, nas etapas de aplicação do adesivo, formação do colchão e prensagem dos painéis (IWAKIRI et al., 2012a; SOARES et al., 2017).

Diferentemente do obtido neste trabalho, Hansted et al. (2019), ao produzirem painéis MDP com adição de 0, 25, 50 e 100% de nanocelulose, encontraram valores de 0,70, 0,66, 0,64 e 0,69 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente, não encontrando efeito significativo do nanomaterial para essa propriedade. O mesmo comportamento também foi descrito por Veigel et al. (2011) e Mahrtdt, et al. (2016), onde os autores também não observaram efeito significativo da adição de nanocelulose em relação a densidade do painel. A norma ANSI A208.1 (ANSI, 2009) define que o painel de partículas, para ser enquadrado na classe de “média densidade”, deve apresentar valores que se encontram entre 0,64 e 0,80 g cm<sup>-3</sup>. Sendo assim, observa-se na Tabela 5 que os painéis de todos os tratamentos se encontraram nesta classe.

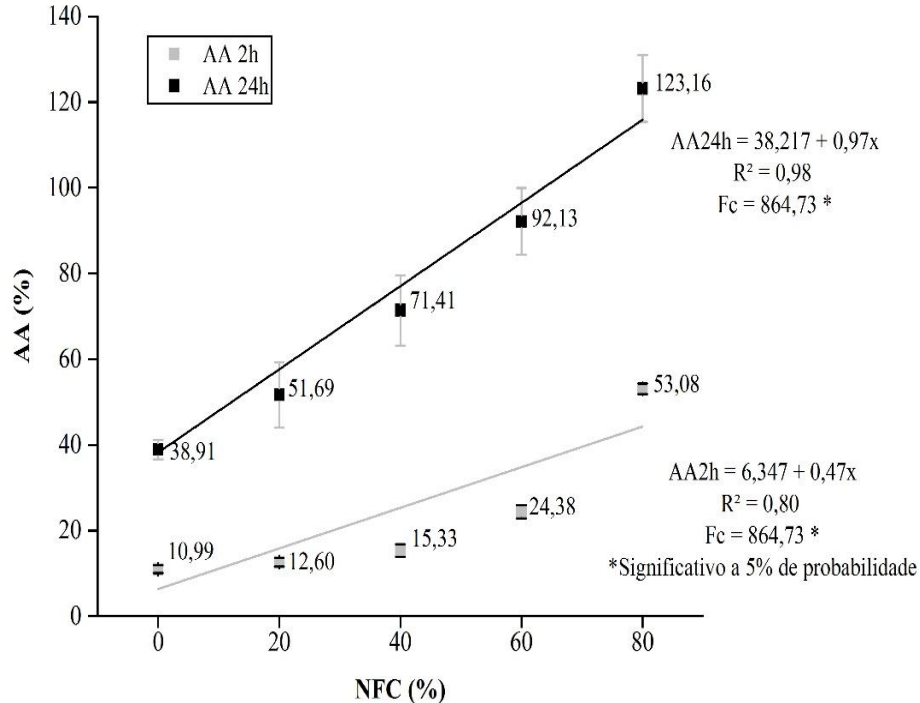
Em relação à razão de compactação, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Os resultados do presente estudo estão fora da faixa de variação recomendado por Moslemi (1974) e Maloney (1993) que é de 1,3 a 1,6. Isto pode ser atribuído pela variação na geometria das partículas e à desuniformidade na etapa de formação do colchão, conseqüentemente, pode ter causado uma menor área de contato entre as partículas e o adesivo, comprometendo a densificação adequada do material (BIANCHE et al., 2012). Segundo Iwakiri (1989), afirma que o tamanho e o formato das partículas determinam o comportamento do painel quanto à absorção de água, estabilidade dimensional, resistência, aspereza da superfície e sua usinabilidade.

Quanto ao teor de umidade, a norma ANSI A208.1 (ANSI, 2009) determina que o valor máximo do teor de umidade deve ser de 10% para todas as classificações. Portanto, todos os tratamentos apresentaram valores dentro do especificado para a norma consultada.

A Figura 5 ilustra os valores médios obtidos para as propriedades de absorção de água, após duas horas de imersão (AA 2h) e após vinte e quatro horas de imersão (AA 24h), respectivamente, obtidos para os painéis aglomerados em função de diferentes concentrações de NFC. Observa-se que houve diferença significativa entre os tratamentos para a propriedade AA 2h e AA 24h. Analisando-se o coeficiente  $\beta_1$  dos modelos de regressão ajustados, percebe-se que o aumento na inserção de NFC ao painel na ordem de 1%, proporciona elevação de 0,47 e 0,97% para AA 2h e AA 24h, respectivamente. O que pode ser comprovado pela curva de regressão, onde a inclinação desta foi mais acentuada após 24 horas de absorção, mostrando

que a maior parte da água não foi absorvida nas primeiras 2 horas de imersão e sim após 24 horas.

Figura 5 – Absorção de água de painéis aglomerados para os diferentes tratamentos.



Fonte: Do autor (2021)

Uma possível explicação para esse fenômeno, é que o efeito da parafina no painel se mostrou mais eficiente em curto prazo, pois esta substância é hidrofóbica e teve papel na redução da higroscopicidade do painel (GUIMARÃES JUNIOR et al., 2013). Outro fator que contribuiu para a ocorrência desta tendência está relacionada com a quebra de ligações aminometileno do adesivo UF causada pela água (PIZZI; MITTAL, 2003; MAHRDT et al., 2016). Possivelmente, as NFC estavam ligadas nas 2 primeiras horas a UF, e conforme aumenta-se o tempo de imersão em água, essa ligação pode ter sido enfraquecida levando a NFC a se ligarem preferencialmente às moléculas de água. Segundo Guimarães Junior et al. (2013) e Khanjanzadeh et al. (2019), grupos hidroxílicos livres, principalmente na região amorfa da celulose e hemiceluloses são os principais responsáveis pela ligação com as moléculas de água nas cavidades celulares, afetando a absorção de água dos painéis.

Situação semelhante foi reportada por Mesquita et al. (2019), que avaliaram o efeito da adição de diferentes concentrações (0, 0,5, 1, 2, 3 e 5%) de nanocristais de celulose (NCC) no adesivo (UF) visando à produção de painéis aglomerados. Eles obtiveram valores que variaram de 52,00 a 81,00% para AA 2h e 86,00 a 112,00% para AA 24h. Ao passo que Yildirim e Candan (2021), avaliando as propriedades de painéis aglomerados em relação a diferentes

proporções de nanocelulose e ácido bórico, observaram valores para AA 2h variando de 101% a 150% e para AA 24h de 139% a 212%. Destaca-se que os valores do trabalho citado são superiores em relação aos obtidos neste estudo.

Sulaiman et al. (2018) substituíram o adesivo UF por amido de dendê modificado para fabricar painéis aglomerados. Estes autores analisaram os painéis com duas densidades alvo (600 e 800 kg/m<sup>3</sup>) em dois tempos de prensagem diferentes (15 e 20 min). Para a densidade alvo de 600 kg/m<sup>3</sup> e tempo de prensagem de 15 minutos, obtiveram valores médios para AA 2h e AA 24h de 63,2 e 83,07%, respectivamente.

Nadhari et al. (2019) avaliaram painéis aglomerados fabricados a partir de resíduos de tronco de banana pré-traçadas a vapor sem uso de adesivo sintético. Estes autores encontraram valores para AA 24 h de 83,24, 119,12 e 94,31% utilizando três diferentes condições de temperatura 111, 121 e 131 °C, respectivamente. Essa divergência de resultados quanto aos diferentes ganhos de umidade dos painéis do presente estudo em relação aos encontrados na literatura, provavelmente é justificada pelas diferentes metodologias empregadas, material envolvido no estudo, porcentagem de adição como também pela ausência de adesivo e parafina no processo produtivo dos painéis.

A Figura 6 apresenta os valores médios obtidos para as propriedades de inchamento em espessura, após duas e vinte quatro horas (IE 2h) e (IE 24h) de imersão em água, respectivamente, obtidos para os painéis aglomerados em função de diferentes concentrações de NFC. Observa-se na Figura 6 que houve diferença significativa entre os tratamentos para a propriedade IE 2h e IE 24h. Analisando-se o coeficiente  $\beta_1$  dos modelos de regressão ajustados, percebe-se que o aumento da inserção de NFC no painel na ordem de 1%, proporciona elevação de 0,15 e 0,56% para IE 2h e IE 24h, respectivamente.

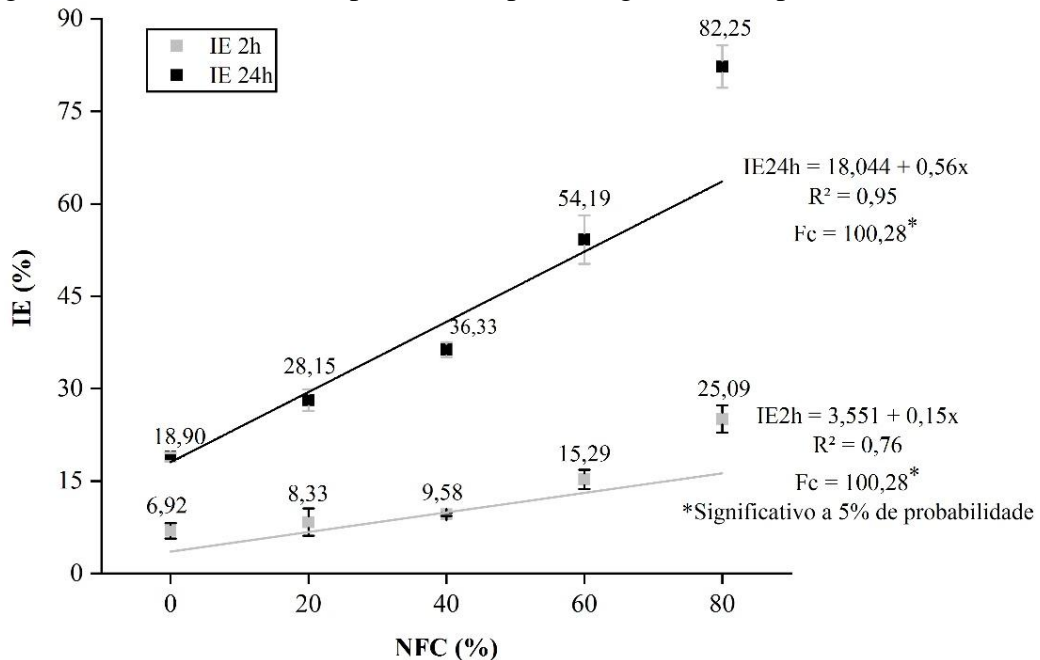
De forma análoga ao que foi comentado para a propriedade AA 2h e AA 24h, nota-se o mesmo comportamento para o inchamento IE 2h e IE 24h. Essa tendência pode ser justificada pela presença de muitos grupos hidroxilas na superfície das NFC, aumentando a cinética do inchamento do material (ATTA-OBENG; VIA; FASINA, 2012; CUI et al., 2015). Associado a isso, o material quando é reduzido a partículas sua área superficial é aumentada, ou seja, existe uma maior interação entre a partícula e a água, o que gera altos valores de absorção de água e inchamento em espessura nos painéis (GUIMARÃES JUNIOR et al., 2013).

Comparando os valores de inchamento obtidos com os resultados do trabalho de Soares et al. (2017), que avaliaram painéis aglomerados com adição de 1% de parafina e com 8% de adesivo UF, os autores obtiveram valores para IE 2h e IE 24h de 18,69% e 36,42%, respectivamente. Já Sulaiman et al. (2018) obtiveram valores para IE 2h e IE 24h de 23,22 e



29,22%, respectivamente, enquanto Veigel et al. (2012) encontrou valor para IE 24h de 29% incorporando 3% de nanocelulose aos painéis aglomerados. Apenas os painéis produzidos com adição de 40% de NFC avaliados nesse trabalho se mostraram próximos com os dados obtidos em literatura.

Figura 6 – Inchamento em espessura dos painéis aglomerados produzidos com NFC.



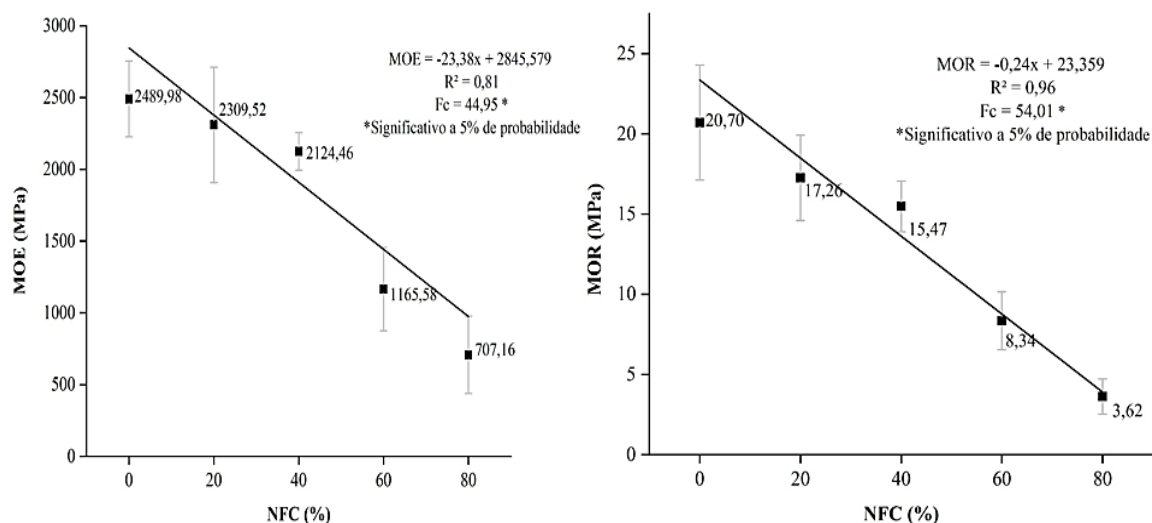
Fonte: Do autor (2021).

A norma ANSI A208.1 (ANSI, 2009) considera aceitável percentual de até 35% de inchamento em espessura dos painéis após 24 horas de imersão em água. Substituindo esse valor na equação de regressão, encontra-se valor ideal de nanofibrilas que poderiam ser adicionadas aos painéis a fim de atender essa especificação. Sendo assim, apenas os painéis com adição de até 31% de NFC atendem a normativa.

### 3.6.3 Propriedades mecânicas

A Figura 7 ilustra os valores médios de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR), respectivamente, obtidos para os painéis aglomerados em função de diferentes concentrações de NFC. A propriedade à flexão estática (MOE e MOR) foi significativamente afetada pela substituição de adesivo UF por NFC. Os resultados de MOR e MOE apresentaram a mesma tendência, demonstrando a grande influência da interface madeira-UF-NFC sobre essas propriedades dos painéis aglomerados.

Figura 7 – Propriedades à flexão estática (MOE e MOR) dos painéis aglomerados produzidos com NFC.



Fonte: Do autor (2021).

Resultado semelhante foi descrito por Atta-Obeng, Via e Fasina (2012), onde os autores analisaram o efeito da inclusão do MCC (celulose microcristalina) em adesivo fenol formaldeído em duas proporções (0 e 10%) visando a produção de painéis aglomerados. Observaram que a inclusão do MCC teve efeito negativo nas propriedades mecânicas dos painéis aglomerados (MOE e MOR). Segundo os autores a diminuição nas propriedades mecânicas pode estar ligada ao fato da elevada quantidade de MCC utilizada, uma vez que essas partículas tendem a aglomerar e desta forma prejudicar a dispersão e consequentemente afetar negativamente as propriedades dos painéis. Outro fator que também pode explicar a baixa propriedade mecânica com o incremento da MCC ao painel seria a área de superfície, uma vez que as MCC podem reagir preferencialmente com o adesivo devido a sua maior área de superfície, diminuindo desta forma os locais de ligação das partículas de madeira.

Já Mesquita et al. (2019), avaliando a produção de aglomerados com adição de CNC (celulose nanocristalina) não verificaram aumento significativo nos valores médios do MOR e MOE com a adição de celulose nanocristalina. Essa diferença quanto aos resultados provavelmente está ligada ao tipo e quantidade de nanocelulose utilizada, matéria prima para a confecção dos painéis e metodologia diferente.

De acordo com Iwakiri et al. (2005), Bianche et al. (2017), Pizzi e Mittal (2018) no caso de painéis aglomerados a baixa viscosidade dos adesivos pode promover situações como uma maior penetração e absorção pela madeira, devido a sua alta fluidez, e em casos extremos pode levar a formação de uma linha de cola faminta, ou seja, quantidade insuficiente de adesivo na linha de cola. Dessa forma, há o comprometimento da qualidade da colagem (IWAKIRI et al.,

2005; PIZZI; MITTAL, 2018), e conseqüentemente, das propriedades finais dos painéis produzidos. Essa situação corrobora com o observado pela análise de microscopia (FIGURA 4), onde foi observada que a adição de NFC ao painel ocasionou a formação de superfícies mais lisas, o que prejudica a qualidade da colagem e conseqüentemente afeta negativamente as propriedades mecânicas dos painéis.

A norma CS 236-66 (CS, 1968) estipula o valor mínimo de 1.723 MPa para o MOE e de 11 MPa para o MOR. Substituindo esses valores nas equações de regressão descrita na Figura 7 observa-se os valores ideais quanto à porcentagem de NFC para atenderem a essa normativa. Nesse contexto, quanto ao MOE o ideal é adicionar até 48% de NFC ao painel. Enquanto para o MOR a adição de até 51% de NFC é recomendável. Já a norma ANSI A208.1 (ANSI, 2009) estabelece os valores mínimos de 2500 MPa para o MOE e de 15 MPa para o MOR, que se refere aos painéis do tipo standard (M-3i). Logo os painéis com até 14 e 34% de NFC serão capazes de atender a esses requisitos.

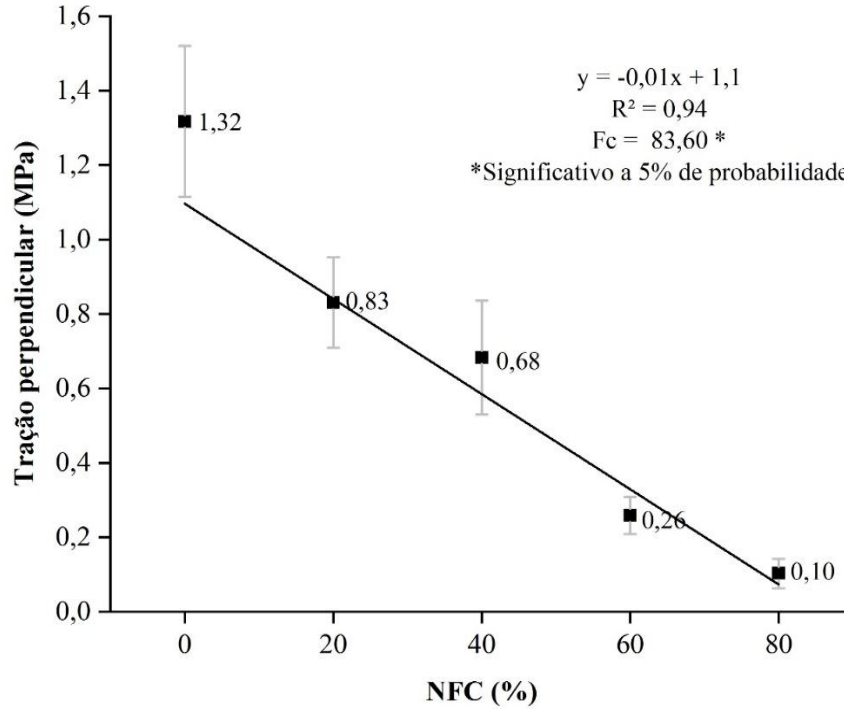
A Figura 8 ilustra os valores médios de tração perpendicular (TP) obtidos para os painéis aglomerados em função de diferentes concentrações de NFC. Semelhante a MOR e MOE, os valores de TP diminuiram com o aumento da quantidade de NFC, de modo que os painéis controle obtiveram maior valor (1,32 MPa). Resultados divergentes foram encontrados por Mesquita et al. (2019), onde os autores observaram que a adição de CNC (celulose nanocrystalina) em painéis aglomerados não promoveu melhoria quanto a propriedades de ligação interna. Segundo os autores, essa situação pode ser explicada pelo efeito na distribuição e dispersão dos adesivos que foram insuficientes devido a problemas de interação em relação às partículas dos painéis e a viscosidade do adesivo.

Esse comportamento foi diferente no estudo de Hunt, Leng e Tajvidi (2017), que investigaram os efeitos das propriedades de resistência de ligação interna de painéis de partículas contendo NFC em diferentes concentrações (10, 15 e 20%) e encontraram valores variando de 0,41 MPa a 0,55 MPa. Os autores relataram que o aumento de NFC promoveu aumento das propriedades de ligação interna quando se utiliza painéis de partículas de alta densidade.

Segundo Hu et al. (2014), a melhora deste parâmetro é atribuída à maior interação interfacial entre o aderente (UF-NFC) e substrato (painel) que é proporcionada pelo potencial de reações químicas entre os grupos metilol do adesivo UF e os grupos hidroxila livres da NFC (CHIRAYIL et al., 2014). Narciso et al. (2021) produziram painéis aglomerados de média densidade (MDP) com partículas de *P. oocarpa* substituídas por diferentes porcentagens de casca de coco (0,25, 50, 75 e 100%) encontrando valores para TP variando de 0,72 a 0,32 MPa.

Os painéis produzidos com 20% NFC avaliados nesse trabalho se mostraram superiores com os dados obtidos em literatura.

Figura 8 – Tração perpendicular dos painéis aglomerados produzidos com NFC.



Fonte: Do autor (2021).

A norma ANSI A208.1 (ANSI, 2009) estabelece valor mínimo de tração perpendicular de 0,50 MPa. Substituindo esse valor na equação de regressão, encontra-se valor ideal de NFC que pode ser adicionado ao painel a fim de atender essa especificação. Desta forma, a adição de até 60% de NFC ao painel atende a quantidade ideal estabelecida pela norma. Tal fato demonstra o potencial de uso de NFC como um substituto parcial para o adesivo UF sendo utilizada na produção de painéis aglomerados.

#### 4 CONCLUSÕES

Nas análises dos adesivos, o incremento de NFC em substituição ao adesivo UF promoveu diminuição no teor de sólidos, pH, viscosidade e do tempo de gel, além da estabilidade térmica dos adesivos.

Para densidade aparente e teor de umidade dos painéis, todas as composições enquadraram-se na faixa recomendada pela norma ANSI A208.1 (ANSI, 2009) e podem ser classificados como painéis de média densidade. Por outro lado, o caráter hidrofílico das NFC proporcionou aumento da absorção de água e do inchamento em espessura. Dessa forma, os

painéis produzidos com até 31% de NFC mostrou-se mais adequada, conforme os valores mínimos estipulados pela norma ANSI A208.1 (ANSI, 2009).

Dentre as propriedades mecânicas analisadas, o incremento de NFC promoveu redução nas propriedades à flexão estática (MOE e MOR) e TP. A adição de 48 e 51% de NFC ao painel atendeu a respectiva norma CS 236-66 (CS, 1968) para MOE e MOR. Enquanto a norma ANSI A208.1 (ANSI, 2009) o ideal é adicionar 14 e 34% de NFC. Para a TP adição de até 60% de NFC ao painel atendeu a quantidade ideal estabelecida pela norma anterior.

Portanto, os painéis aglomerados produzidos com NFC apresentaram potencial de utilização e se mostraram uma alternativa viável do ponto de vista ambiental e tecnológico para a indústria de aglomerados. Contudo, recomenda-se que sejam feitos outros procedimentos experimentais, utilizando, por exemplo, modificações químicas ou incorporação de compatibilizadores com a finalidade de melhorar a dispersão e adesão das NFC em polímeros hidrofóbicos.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1:** Particleboard. Gaithersburg, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **ASTM D1200-10:** Standard test method for viscosity by ford viscosity cup. West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1037:** Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles. West Conshohocken, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1582-60:** Annual book of standards: Denver, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2471-99:** Standard test method for gel time and peak exothermic temperature of reacting thermosetting resins. West Conshohocken, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E70-07:** Standard test method for pH of aqueous solutions with the glass electrode. West Conshohocken, 2015.

ANDRADE N. C.; SABINO, T. P. F.; TERRA, I. C. C.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F. Painéis MDP produzidos com resíduos de extração de celulose. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, v. 14, n. 3, p. e6446, 2019.

ARAUJO, C. K. C.; CAMPOS, C. I.; CAMARGO, S. K. C. A.; CAMARGO, B. S. Caracterização mecânica de painéis particulados de média densidade produzidos a partir de resíduos de madeira. **R. Gest. Industr.**, v. 15, n. 1, p. 197-211, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941:** Madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999:** Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853:** Madeira – Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989:** Pasta celulósica e madeira – Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010.

ATTA-OBENG, E.; VIA, B. K.; FASINA, O. Effect of microcrystalline cellulose species, and particle size on mechanical and physical properties of particleboard. **Wood Fiber Sci.**, v. 44, p. 227-235, 2012.

BIANCHE J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; LUCIA, R. M. D. Cisalhamento na linha de cola de Eucalyptus sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00077114, 2017.

BIANCHE, J. J.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, F. A.; SANTOS, R. C.; SORATTO, D. N. Propriedades de painéis aglomerados fabricados com partículas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), paricá (*Schizolobium amazonicum*) e vassoura (*Sida* spp.). **Cerne**, v. 18, n. 4, p. 623-630, 2012.

BOSCHETTI, W. T. N. **Produção e caracterização de nanocristais e microcristais de celulose e sua aplicação em adesivos de ureia-formaldeído**. 2017. 129 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

BRINCHI, L.; COTANA, F.; FORTUNATI, E.; KENNY, J. M. Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: technology and applications. **Carbohydr. Polym.**, v. 94, p. 154-169, 2013.

BUFALINO, L. et al. How the chemical nature of Brazilian hardwoods affects nanofibrillation of cellulose fibers and film optical quality. **Cellulose**, v. 22, n. 6, p. 3657-3672, 2015.

BUFALINO, L.; ALBINO, V. C. S.; SÁ, V. A.; CORRÊA, A. A. R.; MENDES, L. M.; ALMEIDA, N. A. Particleboards made from Australian red cedar: processing variables and evaluation of mixed species. **J. Trop. For. Sci.**, v. 24, n. 2, p. 162-172, 2012.

CANDAN, Z.; AKBULUT, T. Developing environmentally friendly wood composite panels by nanotechnology. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 3590-3598, 2013.

CARDOSO, G. V.; PEREIRA, F. T.; FERREIRA, É. S.; LOPES, M. C.; ZANATTA, P.; MELLO, L. R. D. S. Nanocelulose como catalisador de uréia-formaldeído para produção de painéis aglomerados. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 15., 2016, Curitiba. Anais do XV EBRAMEM, Curitiba, 2016. pp. 1-9.

CARVALHO, A. G.; ZANUNCIO, A. J. V.; MORI, F. A.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Adesivos Naturais e Sintéticos em Painéis Compensados. **Braz. J. Wood Sci.**, v. 7, n. 1, p. 28-35, 2016.

CHEN, C. L. Determination of Total and Aliphatic Hydroxyl Groups. In: LIN, S. Y.; DENCE, C. W. (Eds.). **Methods Lignin Chemistry**, Berlin: Springer Heidelberg, 1992. pp. 409-422.

CHEN, H.; NAIR, S. S.; CHAUHAN, P.; YAN, N. Lignin containing cellulose nanofibril application in pMDI wood adhesives for drastically improved gap-filling properties with robust bondline interfaces. **Chem. Eng. J.**, v. 360, p. 393-401, 2019.

CHIRAYIL, C. J.; JOY, J.; MATHEW, L.; KOETZ, J.; THOMAS, S. Nanofibril reinforced unsaturated polyester nanocomposites: Morphology, mechanical and barrier properties, viscoelastic behavior and polymer chain confinement. **Ind. Crop Prod.**, v. 56, p. 246-254, 2014.

CLOUTIER, A. Oriented strandboard (OSB): raw material, manufacturing process, properties and uses. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 1998. pp. 173-185.

COMMERCIAL STANDARD. **CS 236-66**: Mat formed wood particleboard. [S.l.], 1968.

CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A.; PASTORE, T. C. M.; CHRISTO, A. G. **Madeiras comerciais do Brasil**: chave interativa de identificação baseada em caracteres gerais e macroscópicos. Serviço Florestal Brasileiro, Laboratório de Produtos Florestais: Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/lpf/madeira/introducao>>. Acesso em: 11 mar. 2021.

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. **Ann. For. Sci.**, v. 72, p. 27-32, 2015.

DAMÁSIO, R. A. P.; CARVALHO, A. G.; GOMES, F. J. B.; CARNEIRO, A. C. O.; FERREIRA, J. F.; COLODETTE, J. L. Interação de nanocristais de celulose com o adesivo ureia-formaldeído em juntas coladas de *Eucalyptus* sp. **Sci. For.**, v. 45, n. 113, p. 169-176, 2017.

DIOP, C. I. K.; TAJVIDI, M.; BILODEAU, M. A.; BOUSFIELD, D. W.; HUNT, J. F. Evaluation of the incorporation of lignocellulose nanofibrils as sustainable adhesive replacement in medium density fiberboards. **Ind. Crop Prod.**, v. 109, p. 27-36, 2017.

ESKILSON, O. et al. Self-assembly of mechanoplasmonic bacterial cellulose-metal nanoparticle composites, **Adv. Funct. Mater.**, v. 30, p. e2004766, 2020.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood**: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin: Walter de Gruyter, 1989. 613 p.

FIORELLI, J.; GALO, R.G.; CASTRO JUNIOR, S.L.; BELINI, U. L.; LASSO, P. R. O.; SAVASTANO, H. Multilayer particleboard produced with agroindustrial waste and Amazonia vegetable fibres. **Waste Biomass Valorization**, v. 9, n. 7, p. 1151-1161, 2018.

FONSECA, A. S.; MORI, F. A.; TONOLI, G. H. D.; SAVASTANO JUNIOR, H.; FERRARI, D. L.; MIRANDA, I. P. A. Properties of an Amazonian vegetable fiber as a potential reinforcing material. **Ind. Crop Prod.**, v. 47, p. 43-50, 2013.

GARDNER, D. J.; OPORTO, G. S.; MILLS, R.; SAMIR, M. A. S. A. Adhesion and Surface Issues in Cellulose and Nanocellulose. **J. Adhes. Sci. Technol.**, v. 22, p. 545-567, 2008.

GHANI, A.; ASHAARI, Z.; BAWON, P.; LEE, S. H. Reducing formaldehyde emission of urea formaldehyde-bonded particleboard by addition of amines as formaldehyde scavenger. **Build. Environ.**, v. 142, p. 188-194, 2018.



GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; FERRO, F. S.; SILVA, D. A. L.; FEIJOO, G.; LAHR, F. A. R.; MOREIRA, M. T. Cross-country comparison on environmental impacts of particleboard production in Brazil and Spain. **Resour. Conserv. Recycl.**, v. 150, p. e104434, 2019.

GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; GUIMARÃES, B. M. R.; MELO, R. R. Efeito do teor da parafina nas propriedades físico-mecânicas de painéis aglomerados de *Pinus oocarpa*. **Braz. J. Wood Sci.**, v. 4, n. 1, p. 72-82, 2013.

GUIMARÃES JUNIOR, M.; BOTARO, V. R.; NOVACK, K. M.; FLAUZINO NETO, W. P.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H. D. Preparation of Cellulose Nanofibrils from Bamboo Pulp by Mechanical Defibrillation for Their Applications in Biodegradable Composites. **J. Nanosci. Nanotechnol.**, v. 15, n. 9, p. 6751-6768, 2015.

HANSTED, F. A. S.; HANSTED, A. L. S.; PADILHA, E. R. D.; CARASCHI, J. C.; GOVEIA, D.; CAMPOS, C. I. The use of nanocellulose in the production of medium density particleboard panels and the modification of its physical properties. **BioResources**, v. 14, n. 3, p. 5071-5079, 2019.

HU, K.; KULKARNI, D. D.; CHOI, I.; TSUKRUK, V. V. Graphene-polymer nanocomposites for structural and functional applications. **Prog. Polym. Sci.**, v. 39, p. 1934-1972, 2014.

HUNT, J. F.; LENG, W.; TAJVIDI, M. Vertical density profile and internal bond strength of wet-formed particleboard bonded with cellulose nanofibrils. **Wood Fiber Sci.**, v. 49, n. 4, p. 1-11, 2017.

IRLE, M.; BARBU M. C. Wood-based Panel Technology. In: THOEMEN, H.; IRLE, M.; SERNEK, M. (Eds.). **Wood-based Panels: An Introduction for Specialists**. London: Brunel University Press, 2010. pp. 1-94.

IWAKIRI, S. **A influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de *Pinus***. 1989. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

IWAKIRI, S.; ANDRADE, A. S.; CARDOSO JUNIOR, A. A.; CHIPANSKI, E. R.; PRATA, J. G.; ADRIAZOLA, M. K. O. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melanina-ureia-formaldeído. **Cerne**, v. 11, n. 4, p. 323-328, 2005.

IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J. G. Produção de painéis aglomerados homogêneos e multicamadas de *Melia azedarach* (Cinamomo) e *Pinus taeda* com diferentes teores de resina. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 465-470, 2012a.

IWAKIRI, S.; SILVA, L. S.; TRIANOSKI, R.; BONDUELLE, G. M.; ROCHA, V. Y. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, v. 18, n. 2, p. 303-308, 2012b.

IWAKIRI, S.; VIANEZ, B. F.; WEBER, C.; TRIANOSKI, R.; ALMEIDA, V. C. Avaliação das propriedades de painéis aglomerados produzidos com resíduos de serrarias de nove espécies de madeiras tropicais da Amazônia. **Acta Amaz.**, v. 42, p. 59-64, 2012c.

KABOORANI, A.; RIEDL, B. Effects of adding nano-clay on performance of polyvinyl acetate (PVA) as a wood adhesive. **Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.**, v. 42, p. 1031-1039, 2011.

KALIA, S.; DUFRESNE, A.; CHERIAN, B. M.; KAITH, B. S.; AVÉROUS, L.; NJUGUNA, J. Cellulose-based bio- and nanocomposites: A review. **Int. J. Polym. Sci.**, v. 2011, p. e837875, 2011.

KHALIL, H. P. S. A.; DAVOUDPOUR, Y.; ISLAM, MD. N.; MUSTAPHA, A.; SUDESH, K.; DUNGANI, R.; JAWAID, M. Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review. **Carbohydr. Polym.**, v. 99, p. 649-665, 2014.

KHANJANZADEH, H.; BEHROOZ, R.; BAHRAMIFA, N.; PINKL, S.; GINDL-ALTMUTTER, W. Application of surface chemical functionalized cellulose nanocrystals to improve the performance of UF adhesives used in wood based composites – MDF type. **Carbohydr. Polym.**, v. 206, p. 11-20, 2019.

KNOP, W. G.; MEIER, M. M.; PEZZIN, S. H. Preparação e caracterização de microcápsulas de poli (ureia-formaldeído) preenchidas com dicitlopentadieno. **Matéria**, v. 19, n. 3, p. 266-273, 2014.

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-Cien. Tecnol.**, v. 23, p. 1-10, 2020.

MAHRDT, E.; PINKL, S.; SCHMIDBERGER, C.; HERWIGNEN, H. W. G. V.; VEIGEL, S.; GINDL-ALTMUTTER, W. Effect of addition of microfibrillated cellulose to urea-formaldehyde on selected adhesive characteristics and distribution in particle board. **Cellulose**, v. 22, p. 571-580, 2016.

MAHRDT, E.; STÖCKEL, F.; VAN HERWIJNEN, H. W. G.; MÜLLER, U.; KANTNER, W.; MOSER, J.; GINDL-ALTMUTTER, W. Light microscopic detection of UF adhesive in industrial particle board. **Wood Sci Technol.**, v. 49, p. 517-526, 2015.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing**. São Francisco: Miller Freeman, 1993.

MANTANIS, G. I.; ATHANASSIADOU, E. T.; BARBU, M. C.; WIJNENDAELE, K. Adhesive systems used in the European particleboard, MDF and OSB industries. **Wood Mater. Sci. Eng.**, v. 13, n. 2, p. 104-116, 2018.

MENDES, R. F.; BALEEIRO, N. S.; MENDES, L. M.; SCATOLINO, M. V.; OLIVEIRA, S. L.; PROTÁSIO, T. P. Particleboard panels produced with different radial positions of *Pinus oocarpa* wood. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, p. 1-7, 2018.

MENDOZA, Z. M. S. H.; BORGES, P. H. M.; RIBEIRO, A. S.; FERNANDES, F. B. Aspectos gerais sobre adesivos para madeira. **Multitemas**, v. 22, n. 51, p. 49-68, 2017.

MESQUITA, R. G. A.; MENDES, L. M.; SANADI, A. R.; SENA NETO, A. R.; CLARO, P. I. C.; CORRÊA, A. C.; MARCONCINI, J. M. Urea Formaldehyde and Cellulose Nanocrystals Adhesive: Studies Applied to Sugarcane Bagasse Particleboards. **J. Polym. Environ.**, v. 26, p. 3040-3050, 2018.

MESQUITA, R. G. A.; SANADI, A. R.; MARCONCINI, J. M.; CORREA, A. C.; CÉSAR, A. A. S.; ANDRADE, L. M. F.; LOPES, T. A.; SIMÃO, J. A.; MENDES, L. M. The effect of cellulose nanocrystals in sugarcane bagasse particleboards of pith and fibers. **Cerne**, v. 25, n. 2, p. 203-213, 2019.

MORALES, L. O.; IAKOVLEV, M.; MARTIN-SAMPEDRO, R.; RAHIKAINEN, J. L.; LAINE, J.; VAN HEININGEN, A.; ROJAS, O. J. Effects of residual lignin and heteropolysaccharides on the bioconversion of softwood lignocellulose nanofibrils obtained by SO<sub>2</sub>-ethanol-water fractionation. **Bioresour. Technol.**, v. 161, p. 55-62, 2014.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard: Materials**. London: Southern Illinois: University Press. 1974. 244 p.

MOSLEMI, A.; ZOLFAGHARLOO, M.; BEHZAD, T.; PIZZI, A. Addition of cellulose nanofibers extracted from rice straw to urea formaldehyde resin; effect on the adhesive characteristics and medium density fiberboard properties. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 99, p. e102582, 2020.

MYERS, G. E. Mechanisms of formaldehyde release from bonded wood products. In: MEYER, B.; ANDREWS, B. A. K.; REINHARDT, R. M. (Eds.). **Formaldehyde release from wood products**. ACS Symposium Series 316. Washington, DC: American Chemical Society, 1986. pp. 87-106.

NADHARI, W. N. A. W.; DANISH, M.; NASIR, M. S. R. M.; GENG, B. J. Mechanical properties and dimensional stability of particleboard fabricated from steam pre-treated banana trunk waste particles. **J. Build. Eng.**, v. 26, p. e100848, 2019.

NAKANISHI, E. Y.; CABRAL, M. R.; GONÇALVES, P. S.; SANTOS, V.; SAVASTANO JUNIO, H. Formaldehyde-free particleboards using natural latex as the polymeric binder. **J. Clean. Prod.**, v. 195, p. 1259-1269, 2018.

NARCISO, C. R. P. **Influência do resíduo de minério de ferro na produção de painéis cimento - madeira**. 2018. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

NARCISO, C. R. P.; REIS, A. H. S.; MENDES, J. F.; NOGUEIRA, N. D.; MENDES, R. F. Potential for the Use of Coconut Husk in the Production of Medium Density Particleboard. **Waste Biomass Valorization**, v. 12, 1647–1658, 2021.

OSONG, S. H.; NORGRÉN, S.; ENGSTRAND, P. An approach to produce nano-lignocellulose from mechanical pulp fine materials. **Nord. Pulp Pap. Res. J.**, v. 28, n. 4, p. 472-479, 2013.

PARK, B.-D.; AYRILMIS, N.; KWON, J. H.; HAN, T. H. Effect of microfibrillated cellulose addition on thermal properties of three grades of urea-formaldehyde resin. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 72, p. 75-79, 2017.

PINATI, E.; FARIA, D. L.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; PROTÁSIO, T. P.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Painéis compensados sarrafeados produzidos com *Pinus oocarpa*, *Castilla ulei* e *Acrocarpus fraxinifolius*. **Braz. J. Wood Sci.**, v. 9, n. 3, p. 199-208, 2018.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. 2nd Ed. New York: Marcel Dekker, 2003. 1024 p.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. 3rd Ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. 658 p.

ROUMELI, E.; PAPADOPOULOU, E.; PAVLIDOU, E.; VOURLIAS, G.; BIKIARIS, D.; PARASKEVOPOULOS, K. M.; CHRISAFIS, K. Synthesis, characterization and thermal analysis of urea-formaldehyde/nanoSiO<sub>2</sub> resins. **Thermochim. Acta**, v. 527, p. 33-39, 2012.

SANTIAGO, S. B.; GONÇALVES, F. G.; LELIS, R. C. C.; SEGUDINHO, P. G. A.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D. C. Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais. **Matéria**, v. 23, n. 3, p. e12151, 2018.

SCATOLINO, M. V.; BUFALINO, L.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.; TONOLI, G. H. D. Impact of nanofibrillation degree of eucalyptus and Amazonian hardwood sawdust on physical properties of cellulose nanofibril films. **Wood Sci. Technol.**, v. 51, p. 1095-1115, 2017a.

SCATOLINO, M. V.; COSTA, A. O.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. *Eucalyptus* wood and coffee parchment for particleboard production: Physical and mechanical properties. **Ciênc. agrotec.**, v. 41, n. 2, p. 139-146, 2017b.

SCATOLINO, M. V.; SILVA, D. W.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Use of maize cob for production of particleboard. **Ciênc. agrotec.**, v. 37, n. 4, p. 330-337, 2013.

SHAHABUDIN, N.; YAHYA, R.; GAN, S. N. Microcapsules of Poly(urea-formaldehyde) (PUF) Containing alkyd from Palm Oil. **Mater. Today Proc.**, v. 38, p. S88-S95, 2016.

SILVA, G. C.; LELIS, R. C. C.; OLIVEIRA, G. L.; SILVA, B. C.; LOSSANO, W. C. S.; ABREU, H. S. Propriedades de adesivo aplicado em painéis a partir da substituição por lignossulfonato do processo sulfito. **Ciênc. Florest.**, v. 29, n. 1, p. 322-335, 2019.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amaz.**, v. 43, n. 2, p.179-184, 2013.

SIRÓ, I.; PLACKETT, D. Microfibrillated cellulose and new composite materials: A review. **Cellulose**, v. 17, n. 3, p. 459-464, 2010.

SOARES, S. S.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; PROTÁSIO, T. P.; LISBOA, F. J. N. Valorização do bagaço de cana-de-açúcar na produção de painéis aglomerados de baixa densidade. **Braz. J. Wood Sci.**, v. 8, n. 2, p. 64-73, 2017.

STOECKEL, F. J.; KONNERTH, W.; GINDL-ALTMUTTER, W. Mechanical properties of adhesives for bonding wood – A review. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 45, pp. 32-41, 2013.

SULAIMAN, N. S.; HASHIM, R.; SULAIMAN, O.; NASIR, M.; AMINI, M. H. M.; HIZIROGLU, S. Partial replacement of urea-formaldehyde with modified oil palm starch based adhesive to fabricate particleboard. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 84, p. 1-8, 2018.

SYVERUD, K.; CHINGA-CARRASCO, G.; TOLEDO, J.; TOLEDO, P. G. A comparative study of *Eucalyptus* and *Pinus radiata* pulp fibres as raw materials for production of cellulose nanofibrils. **Carbohydr. Polym.**, v. 84, p. 1033-1038, 2011.

TAN, Y.; LIU, Y.; CHEN, W.; LIU, Y.; WANG, Q.; LI, J.; YU, H. Homogeneous Dispersion of Cellulose Nanofibers in Waterborne Acrylic Coatings with Improved Properties and Unreduced Transparency. **ACS Sustain. Chem. Eng.**, v. 4, n.7, p. 3766-3772, 2016.

TEODORO, R.; RAABE, J.; SILVA, D. W.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H. D. Functionally graded MDP panels using bamboo particles. **Key Eng. Mater.**, v. 668, p. 39-47, 2015.

THOMAS, B.; RAJ, M. C.; JOY, J.; MOORES, A.; DRISKO, G. L.; SANCHEZ, C. Nanocellulose, a versatile green platform: from biosources to materials and their applications. **Chem. Rev.**, v. 118, n. 24, p. 11575-11625, 2018.

TONOLI, G. H. D.; TEIXEIRA, E. M.; CORRÊA, A. C.; MARCONCINI, J. M.; CAIXETA, L. A.; PEREIRA-DA-SILVA, M. A.; MATTOSO, L. H. C. Cellulose micro/nanofibres from *Eucalyptus* kraft pulp: Preparation and properties. **Carbohydr. Polym.**, v. 89, p. 80-88, 2012.

TRIANOSKI, R. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada**. 2010. 260 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VEIGEL, S.; MÜLLER, U.; KECKES, J.; OBERSRIEBNIG, M.; GINDL-ALTMUTTER, W. Cellulose Nanofibrils as Filler for Adhesives: Effect on Specific Fracture Energy of Solid Wood-Adhesive Bonds. **Cellulose**, v. 18, p. e1227, 2011.

VEIGEL, S.; RATHKE, J.; WEIGL, M.; GINDL-ALTMUTTER, W. Particleboard and oriented strand board prepared with nanocellulose-reinforced adhesive. **J. Nanomater.**, v. 2012, p. e158503, 2012.

WANG, X.; HUANG, Z.; COOPER, P.; WANG, X.-M.; ZHANG, Y.; CASILLA, R. The ability of wood to buffer highly acidic and alkaline adhesives. **Wood Fiber Sci.**, v. 42, n. 3, p. 398-405, 2010.

WANG, X.-M.; CASILLA, R.; ZHANG, Y.; COOPER, P.; HUANG, Z.; WANG, X. A. Effect of extreme pH on bond durability of selected structural wood adhesives. **Wood Fiber Sci.**, v. 48, n. 4, p. 1-15, 2016.

YE, J. T.; QIU, T.; WANG, H.; GUO, L.; LI, X. Study of glycidyl ether as a new kind of modifier for urea- formaldehyde wood adhesives. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 128, n. 6, p. 4086-4094, 2013.

YILDIRIM, M.; CANDAN, Z. Performance Properties of Particleboard Panels Modified with Nanocellulose/Boric Acid, **BioResources**, v. 16, p. 875-890, 2021.

ZHANG, H.; SHE, Y.; SONG, S.; LANG, Q.; PU, J. Particulate reinforcement and formaldehyde adsorption of modified nanocrystalline cellulose in urea-formaldehyde resin adhesive. **J. Adhes. Sci. Technol.**, v. 27, p. 1023-1031, 2012.