



**ANA CAROLINA CORRÊA FURTINI**

**QUALIDADE DE PAINÉIS AGLOMERADOS PRODUZIDOS  
COM ADESIVO A BASE DE UREIA-FORMALDEÍDO  
ASSOCIADO COM CARDANOL**

**LAVRAS – MG  
2021**

**ANA CAROLINA CORRÊA FURTINI**

**QUALIDADE DE PAINÉIS AGLOMERADOS PRODUZIDOS COM ADESIVO A  
BASE DE UREIA-FORMALDEÍDO ASSOCIADO COM CARDANOL**

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. Mario Guimarães Junior  
(Coorientador, CEFET-MG)  
Dr.<sup>a</sup> Luciana de Matos Alves Pinto  
(Coorientadora, DQI/ICN/UFLA)  
Dr.<sup>a</sup> Josy Antevéli Osajima Furtini  
(Coorientadora, DQUI/CCN/UFPI)

**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).**

Furtini, Ana Carolina Corrêa.

Qualidade de painéis aglomerados produzidos com adesivo a base de ureia-formaldeído associado com cardanol / Ana Carolina Corrêa Furtini. - 2021.

74 p. : il.

Orientador(a): José Benedito Guimarães Júnior.

Coorientador(a): Mario Guimarães Junior, Luciana de Matos Alves Pinto, Josy Antevéli Osajima Furtini.

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

Bibliografia.

1. Adesivos. 2. Compósitos. 3. Emissão de formaldeído. I. Guimarães Júnior, José Benedito. II. Guimarães Junior, Mario. III. Pinto, Luciana de Matos Alves. IV. Furtini, Josy Antevéli Osajima.

**ANA CAROLINA CORRÊA FURTINI**

**QUALIDADE DE PAINÉIS AGLOMERADOS PRODUZIDOS COM ADESIVO A  
BASE DE UREIA-FORMALDEÍDO ASSOCIADO COM CARDANOL**

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 08 de abril de 2021.

Dr. José Benedito Guimarães Júnior – UFLA.

Dr. Thiago de Paula Protásio – UFRA.

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

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

Dr. Mario Guimarães Junior  
(Coorientador, CEFET-MG)  
Dr.<sup>a</sup> Luciana de Matos Alves Pinto  
(Coorientadora, DQI/ICN/UFLA)  
Dr.<sup>a</sup> Josy Antevéli Osajima Furtini  
(Coorientadora, DQUI/CCN/UFPI)

**LAVRAS – MG  
2021**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade, saúde e coragem para superar todos os desafios.

Aos meus pais Marco Antonio e Roselene, meu irmão Otávio, que sempre estiveram ao meu lado, me acompanhando, com tanto incentivo, amor e cuidado.

A toda minha família, amigos, por todo companheirismo, incentivo e carinho.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, pela oportunidade concedida de cursar o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos (código de financiamento 001).

À Empresa Resibras Cashol pela doação do cardanol.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Benedito, por estar sempre disposto a ajudar, pelo apoio, paciência e todos os ensinamentos proporcionados para a realização deste trabalho.

Aos meus coorientadores Prof. Dr. Mario, Prof. Dr.<sup>a</sup> Luciana e Prof. Dr.<sup>a</sup> Josy, por toda ajuda e parceria para a realização deste trabalho.

A toda equipe e amigos da UEPAM/NEPAM, pelo companheirismo, amizade e auxílio para a realização deste trabalho.

Enfim, todos aqueles que participaram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho, o meu muito obrigada!

## RESUMO

Os painéis aglomerados surgiram como alternativa para melhor utilização da madeira e preservação do meio ambiente. A ureia-formaldeído (UF) é o adesivo mais produzido e consumido entre a classe desses painéis, devido sua alta reatividade, cura rápida e o preço relativamente baixo. Porém, este adesivo é considerado a principal fonte para emissão de formaldeído, composto altamente cancerígeno e que pode ser emitido durante o uso do painel. No entanto, nos últimos anos pesquisas têm sido desenvolvidas em busca de alternativas de adesivos menos prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. O cardanol derivado do líquido da casca da castanha de caju (LCC) tem atraído considerável atenção pelas suas características químicas, sua posição de dupla ligação que permite inúmeras funcionalizações, além das usuais do anel fenólico e características específicas (antioxidante, resistência à chama e hidrofobicidade). Neste sentido, este estudo objetivou avaliar a qualidade de painéis aglomerados produzidos em escala laboratorial utilizando o cardanol em substituição ao adesivo UF. Os painéis foram produzidos com partículas de *Pinus oocarpa*, com dimensões de 25 x 25 x 1,5 cm (comprimento, largura e espessura) e densidade nominal de 0,75 g/cm<sup>3</sup>. Foram utilizadas diferentes porcentagens do cardanol em substituição a UF, totalizando cinco tratamentos: 0, 20, 40, 60 e 80% de cardanol. Foram avaliadas as propriedades físicas e químicas dos adesivos, e as propriedades físicas, mecânicas, interface madeira-adesivo e a combustibilidade dos painéis. Com os resultados, observou-se que é possível produzir painéis aglomerados substituindo 5% do cardanol pela UF. Além disso, o cardanol atuou como retardante a chamas para painéis aglomerados.

**Palavras-chave:** Adesivos. Compósitos. Emissão de formaldeído.

## ABSTRACT

Particleboard panels have emerged as an alternative for better use of wood and for the environment preservation. Urea-formaldehyde (UF) is the most produced and consumed adhesive among the class of these wood-panels, due to its high reactivity, fast curing, and low price. However, this adhesive is considered the main source for the emission of formaldehyde, a highly carcinogenic compound that can be emitted during the use of the panel. However, in recent years, research has been carried out in search of alternative adhesives that are less harmful to human health and the environment. The cardanol is derived from the cashew nutshell liquid (CNSL) and has attracted emphasis due to its chemical characteristics, as the double bond position, and the antioxidant activity, flame resistance, and hydrophobicity related to the phenolic ring, consisting of a non-toxic compound for human and environment safety. In this perspective, the present study aimed to investigate the effects of the UF replacement with cardanol in particleboard wood-panels. The panels were loaded with particles of *Pinus oocarpa*, with 25 x 25 x 1.5 cm (length, width, and thickness) and nominal density of 0.75 g/cm<sup>3</sup>. Different percentages of cardanol were used to UF replacement, totaling five treatments: 0, 20, 40, 60, and 80% cardanol. The adhesives physical and chemical properties, and the physical and mechanical properties, the wood-adhesive interface and the combustibility of the wood-panels. With the results, it was observed that it is possible to produce agglomerated panels replacing 5% of cardanol by UF. In addition, cardanol acted as a flame retardant for agglomerated panels.

**Keywords:** Adhesives. Composites. Formaldehyde emission.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

Figura 1 – Pannel aglomerado convencional. ....	13
Figura 2 – Processo sintético de adesivos de (a) ureia-formaldeído e (b) fenol-formaldeído. ....	16
Figura 3 – Efeitos causados à saúde da população em diferentes média de concentração e tempo de exposição à emissão de formaldeído. ....	17
Figura 4 – Concentrações médias de formaldeído, acetaldeído e hexanal quantificadas no ar externo, na sala e no quarto. ....	18
Figura 5 – Representação da localização do LCC a partir do caju. ....	22
Figura 6 – Estrutura química dos componentes do LCC. ....	23
Figura 7 – Sítios ativos na estrutura química do cardanol. ....	24

### SEGUNDAPARTE: ARTIGO

Figura 1 – Aparato utilizado para o teste de combustibilidade. ....	45
Figura 2 – Valores percentuais dos teores de extrativos totais, lignina insolúvel, cinzas e holocelulose para a madeira de <i>Pinus oocarpa</i> . ....	47
Figura 3 – Análise de regressão linear do teor de sólidos resinoso dos adesivos em função da porcentagem de cardanol na composição dos painéis. ....	48
Figura 4 – Análise de regressão linear da viscosidade (cP) dos adesivos em função da porcentagem de cardanol na composição dos painéis. ....	49
Figura 5 – Análise de regressão linear do pH dos adesivos em função da porcentagem de cardanol na composição dos painéis. ....	50
Figura 6 – Micrografias eletrônicas de varredura exibindo a fratura na tração dos painéis aglomerados, em ampliação de 500x em diferentes tratamentos. ....	52
Figura 7 – Umidade na base seca dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol. ....	54
Figura 8 – Absorção de água após 2 e 24 horas dos painéis em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol. ....	55
Figura 9 – Inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol. ....	56
Figura 10 – Taxa de não retorno de espessura dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol. ....	58
Figura 11 – Comportamento do módulo de elasticidade (MOE) dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol. ....	59
Figura 12 – Comportamento do módulo de ruptura (MOR) dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol. ....	59
Figura 13 – Tração perpendicular (TP) dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol. ....	61
Figura 14 – Relação da massa restante e o tempo de combustão. ....	62
Figura 15 – Variação de temperatura com o tempo de combustão. ....	63

## LISTA DE TABELAS

### PRIMEIRA PARTE

Tabela 1 – Classificações, limites de emissão de formaldeído e métodos estabelecidos em diferentes países. ....19

### SEGUNDA PARTE: ARTIGO

Tabela 1 – Plano experimental. ....42

Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas.....44

Tabela 3 – Densidade aparente e razão de compactação dos tratamentos em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol. ....53

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	<b>10</b>
<b>1</b> <b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1</b> <b>Objetivo geral</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2</b> <b>Objetivos específicos</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b> <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1</b> <b>Painéis aglomerados</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2</b> <b>Adesivos</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2.1</b> <b>Adesivos nas indústrias de painéis aglomerados</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.2</b> <b>Ureia-formaldeído</b> .....	<b>15</b>
<b>2.3</b> <b>Emissões de Formaldeído</b> .....	<b>16</b>
<b>2.4</b> <b>Alternativas de substituição do formaldeído</b> .....	<b>19</b>
<b>2.4.1</b> <b>Líquido da castanha de caju</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4.2</b> <b>Cardanol</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4.3</b> <b>Estudos de adesivos à base de cardanol</b> .....	<b>25</b>
<b>3</b> <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>28</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>29</b>
<b>SEGUNDA PARTE: ARTIGO</b> .....	<b>37</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>37</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>38</b>
<b>1</b> <b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>39</b>
<b>2</b> <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>41</b>
<b>2.1</b> <b>Obtenção e preparo do material lignocelulósico</b> .....	<b>41</b>
<b>2.2</b> <b>Caracterização física e química do material lignocelulósico</b> .....	<b>41</b>
<b>2.3</b> <b>Síntese e propriedades dos adesivos</b> .....	<b>42</b>
<b>2.4</b> <b>Produção dos painéis aglomerados</b> .....	<b>43</b>
<b>2.5</b> <b>Caracterizações dos painéis</b> .....	<b>43</b>
<b>2.5.1</b> <b>Avaliação interface madeira-adesivo</b> .....	<b>43</b>
<b>2.5.2</b> <b>Propriedades físicas e mecânicas</b> .....	<b>44</b>
<b>2.5.3</b> <b>Teste de combustibilidade</b> .....	<b>44</b>
<b>2.6</b> <b>Análise estatística dos dados experimentais</b> .....	<b>45</b>
<b>3</b> <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>46</b>
<b>3.1</b> <b>Caracterização física e química do material lignocelulósico</b> .....	<b>46</b>
<b>3.2</b> <b>Propriedades dos adesivos</b> .....	<b>48</b>
<b>3.3</b> <b>Caracterizações dos painéis</b> .....	<b>51</b>
<b>3.3.1</b> <b>Avaliação interface madeira-adesivo (MEV)</b> .....	<b>51</b>
<b>3.3.2</b> <b>Propriedades físicas</b> .....	<b>52</b>
<b>3.3.3</b> <b>Propriedades mecânicas</b> .....	<b>58</b>
<b>3.3.4</b> <b>Combustibilidade</b> .....	<b>62</b>
<b>4</b> <b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>64</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>66</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

O cuidado com o meio ambiente é um fator que agrega valor à produção industrial, tornando-a mais competitiva no mercado pelo uso de recursos renováveis (STOFFEL et al., 2014). O Brasil, por exemplo, é destaque mundial na fabricação de painéis de madeira reconstituída, uma vez que possui grande área de reflorestamento de árvores dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, os quais apresentam elevada taxa de crescimento (IBA, 2017; SOTSEK; SANTOS, 2018).

Segundo Soratto et al. (2013), a produção dos painéis reconstituídos, dentre eles os aglomerados, torna-se interessante principalmente pela possibilidade dos benefícios sociais, econômicos e empresariais, uma vez que são comumente produzidos no mundo nos ramos da indústria de móveis e construção. Em 2016, as Nações Unidas relataram que a produção mundial dos painéis aglomerados foi de mais de 932 milhões de metros cúbicos (BORYSIUK et al., 2019; FAO, 2019), mostrando assim a alta demanda dos painéis.

Os painéis aglomerados são fabricados a partir de partículas de madeira ou materiais de biomassa, como serragem, resíduos, dentre outros, colando-os com um adesivo sob calor e pressão (GU, HUANG; LI, 2013). A produção em massa de painéis à base de madeira levou a uma alta demanda de adesivo, especialmente para adesivos termoendurecíveis quimicamente sintéticos, que funcionam com base na reação de formaldeído, ureia, melamina, fenol ou condensados (KHOSRAVI et al., 2010; JANG; HUANG; LI, 2011).

A ureia-formaldeído (UF) é o adesivo mais produzido e consumido entre os produtos compostos à base de madeira, incluindo os painéis de partículas e painéis de fibras (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010; NURYAWAN et al., 2020). Isso ocorre devido sua alta reatividade, cura rápida e o preço relativamente baixo aos demais adesivos, como por exemplo, o fenol-formaldeído e a melanina-formaldeído (IWAKIRI, 2005; LIU et al., 2018). Porém, as principais desvantagens deste adesivo é a baixa resistência a umidade (SILVA et al., 2015) e a emissão de formaldeído que pode ocorrer por meses ou anos (SALTHAMMER; MENTESE; MARUTZKY, 2010).

A International Agency for Research on Cancer (IARC, 2004) classificou o formaldeído como cancerígeno para os seres humanos (Grupo 01) e, a partir de 2006, a

ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) classificou o formaldeído como cancerígeno para o trato respiratório superior, além de sensibilizante dérmico e respiratório, gerando, assim, uma atenção crescente ao meio ambiente e à saúde (CARVALHO; MAGALHÃES; FERRA, 2012).

Desde então, alguns países desenvolvidos da Europa, Estados Unidos, Canadá e Japão, impuseram restrições sobre a quantidade de formaldeído que pode ser liberado durante a produção de painéis de madeira, onde a Europa, por exemplo, permite um máximo de 30 mg/100 g. Como resultado, muitos pesquisadores tentaram reduzir a quantidade de formaldeído adicionado nos adesivos, ou incluíram agentes de captura (LIU et al., 2018). Portanto, materiais de baixo custo, sustentáveis e inofensivos passaram a ser amplamente utilizados na indústria de adesivos (CARVALHO; LELIS; NASCIMENTO, 2014).

O termo “adesivo de base biológica” passou então a ser usado em um sentido muito bem especificado e restrito, incluindo apenas os materiais de origem natural, não mineral, que podem ser usados como tal ou após pequenas modificações para reproduzir o comportamento e desempenho de adesivos sintéticos. Assim, um número limitado de materiais pode ser atualmente incluído no sentido mais restrito dessa definição, tais como taninos, ligninas, carboidratos e óleos insaturados (PIZZI, 2006).

Diante as variedades de óleos insaturados, tais como mamona, soja e palma, o cardanol, derivado do líquido da casca da castanha de caju (LCC), tem atraído considerável atenção por proporcionar maior potencial para aplicações tecnológicas devido à boa processabilidade, alta solubilidade em solventes orgânicos, biodegradabilidade e não toxicidade (KANEHASHI et al., 2013).

Esse material apresenta, portanto, peculiaridades em suas características químicas e físico-químicas, onde a posição de dupla ligação presente em sua cadeia lateral permite inúmeras funcionalizações, além das usuais do anel fenólico e características específicas de seus derivados (antioxidante, resistência à chama e hidrofobicidade). Não possui cheiro agressivo, apresenta baixa volatilização e ponto de ebulição mais alto que os demais compostos fenólicos derivados do petróleo, favorecendo a saúde de quem o manuseia e a do meio ambiente (MAZZETTO; LOMONACO; MELE, 2009).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), a produção de castanha do caju no ano de 2019 foi de aproximadamente 139 mil toneladas. Quando o LCC é extraído por processos térmicos, ele é classificado como LCC técnico e

apresenta em sua composição elevado teor de cardanol, de 60-65% (LOPEZ et al., 2012; KANEHASHI et al., 2013).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade de painéis aglomerados produzidos em escala laboratorial utilizando o cardanol em substituição ao adesivo ureia-formaldeído.

### **1.1 Objetivo geral**

Avaliar a qualidade de painéis aglomerados produzidos em escala laboratorial utilizando o cardanol em substituição ao adesivo ureia-formaldeído.

### **1.2 Objetivos específicos**

- a) Avaliar a melhor proporção do cardanol em substituição à UF para produção de painéis aglomerados;
- b) Avaliar as propriedades físicas e químicas do cardanol em substituição à UF;
- c) Observar a interface madeira-adesivo por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura;
- d) Avaliar qualidade dos painéis aglomerados a partir de ensaios físicos, mecânicos e de combustibilidade.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Painéis aglomerados

Os painéis aglomerados surgiram no início da década de 40 na Alemanha, como forma de viabilizar a utilização de resíduos de madeira, diante a dificuldade de obtenção de madeiras de boa qualidade para produção de painéis compensados, devido ao isolamento da Alemanha durante a Segunda Guerra Mundial (IWAKIRI, 2005). No Brasil, em 1966, começaram a ser produzidos pela indústria, iniciada pelo grupo francês Louis Dreiffus que criou a empresa Placas do Paraná, em Curitiba, devido à abundância de resíduos produzidos na região sul pela indústria moveleira local (MATTOS et al., 2008).

Atualmente, os produtos de madeira vêm destacando por sua grande versatilidade. Os painéis aglomerados possuem forma eficiente em atender a grande demanda no setor moveleiro, assim como na construção civil, evitando excesso de desperdício de matéria-prima e visando ao melhor aproveitamento da madeira na produção dos painéis (ARAÚJO et al., 2019). Conforme Altgen et al. (2019), os painéis aglomerados de madeiras (FIGURA 1) são definidos como compósitos naturais compostos principalmente por dois componentes: partículas de madeira e um aglutinante, normalmente usado o adesivo ureia-formaldeído (UF), e então prensados sob calor e pressão.

Figura 1 – Painel aglomerado convencional.



Fonte: Wood Technology (2007).

Os painéis aglomerados geralmente apresentam alta absorção de água e inchamento em espessura. Esses problemas podem ocorrer devido ao principal adesivo utilizado, ureia-formaldeído, que apresenta baixa resistência à umidade (VITAL et al., 2014). Outros fatores que influenciam as características finais e qualidade dos painéis podem ser relativos à matéria-prima ou ao processo. Em relação aos inerentes à madeira, destaca-se a estrutura

anatômica da madeira, suas propriedades físicas, como por exemplo, a massa específica e teor de umidade, e para as propriedades química os extrativos e pH, por exemplo. Já os fatores inerentes ao processo, abrangem a densidade do painel, razão de compactação, geometria das partículas e parâmetros do ciclo de prensagem (IWAKIRI et al., 2012; SURDI, 2015).

Esses painéis são usados principalmente na produção de móveis, como tampos de mesa, laterais de armários, prateleiras e divisórias e, secundariamente, em edifícios, para pisos de madeira (BLAZUS; HORA; LEITE, 2010). As matérias-primas utilizadas em seu processo de fabricação são diversas, como resíduos industriais de madeira, resíduos da exploração florestal, madeiras de qualidade inferior que não são utilizadas para outros fins e madeiras provenientes de florestas plantadas. No Brasil, a principal fonte de matéria-prima são as florestas plantadas de *Eucalyptus* e *Pinus* (PIERRE; BALLARIN; PALMA, 2014).

## 2.2 Adesivos

Durante séculos, a madeira foi colada com os adesivos de origens naturais até que os adesivos sintéticos, principalmente os termoendurecíveis ou termofixos, assumiram o controle gradualmente no século XX, pois eram tipicamente considerados mais eficientes em termos de custo (FRIHART, 2015), mais estáveis para uso em ambientes de condições úmidas (SOLT et al., 2019) e por apresentarem alta resistência mecânica, química e estabilidade térmica após a cura (GRUENER et al., 2020).

A principal função dos adesivos é a união dos materiais. Esse objetivo é atingido com transmissões de tensões de um substrato para outro, de uma maneira que distribua as tensões de um modo muito mais uniforme. A colagem adesiva geralmente fornece estruturas mecanicamente equivalentes ou mais fortes, podendo promover uma resistência que pode superar as forças coesivas dos próprios substratos com menor custo e peso (EBNESAJJAD; LANDROCK, 2015).

O processo mais importante na colagem é a adesão, o qual pode ser entendido como a interação entre duas superfícies, causada por um forte campo de forças atrativas provenientes dos constituintes de cada superfície (MENDOZA et al., 2017). A adesão na madeira depende de uma série de fatores, como as características inerentes à própria madeira (anatomia, química e física), características do adesivo (químicas e físicas) e do

processo adotado durante a colagem propriamente dita. Os mecanismos envolvidos no processo de adesão podem ser explicados pelas teorias mecânicas, difusão de polímeros e adesão química (MARRA, 1992).

Segundo Iwakiri (2005), a teoria mecânica indica que o adesivo líquido penetra em substratos porosos (madeira) ocorrendo posteriormente à solidificação, com a formação de “ganchos” fortemente presos entre os substratos. Para a difusão de polímeros, a adesão ocorre através da difusão de segmentos de cadeias de polímeros de nível molecular. E para a adesão química, ocorre através de ligações primárias, iônicas ou covalentes e/ou por forças intermoleculares secundárias. Logo, a interação entre a madeira e o adesivo abrange diversos princípios, o qual pode ser caracterizado em diferentes elos, responsáveis por uma ação particular dos adesivos.

### **2.2.1 Adesivos nas indústrias de painéis aglomerados**

Os painéis de madeira, entre eles os aglomerados, são os que mais utilizam adesivos e representam mais de 65% em volume de todos os adesivos usados por ano no mundo (PIZZI, 2016). Deste modo as indústrias de painéis aglomerados dependem amplamente dos adesivos utilizados que correspondem em até 32% dos custos de fabricação (SELLERS, 2001).

As indústrias de painéis aglomerados é uma das maiores indústrias de compósitos à base de madeira do mundo, que confiam totalmente em adesivos à base de formaldeído. Embora os adesivos à base de formaldeído tenham muitas vantagens sobre os adesivos de base natural, eles emitem formaldeído de natureza cancerígena (MOUBARIK et al., 2010).

### **2.2.2 Ureia-formaldeído**

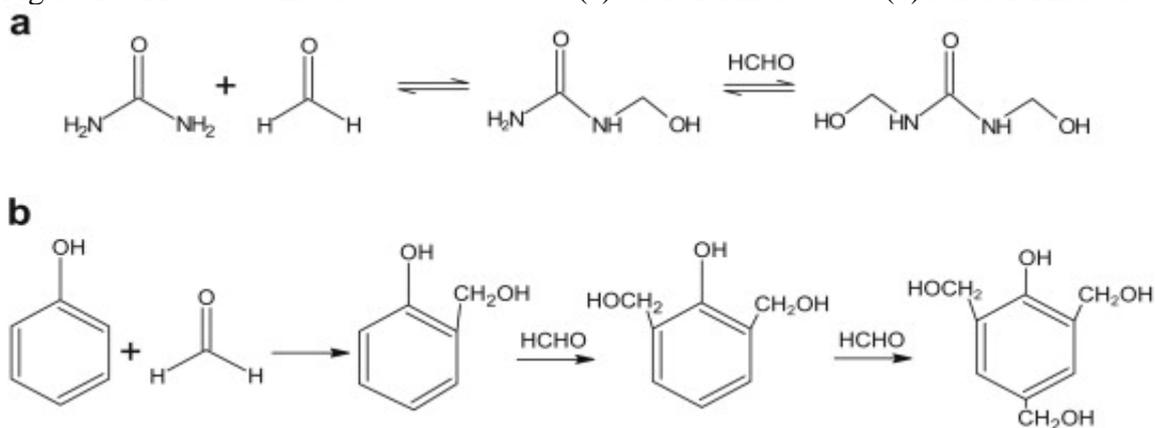
A ureia-formaldeído (UF) é definida como polímeros sintéticos termoendurecíveis opaco, cuja composição é baseada na reação de dois monômeros: ureia e formaldeído (LIU et al., 2018). Esse adesivo tem sido amplamente utilizado na produção de painéis aglomerado (MANTANIS et al., 2018), devido sua alta reatividade, cura rápida, preço relativamente baixo em comparação aos demais adesivos para painéis de madeira, e bom desempenho mecânico, o que o torna um dos principais adesivos para a indústria da

madeira. A atual produção global de adesivos de UF excede 5 milhões de toneladas (t) por ano (PAPADOPOULOU et al., 2016).

Apesar de suas vantagens, um estudo revelou que o adesivo UF é a principal fonte que contribui para a emissão do formaldeído em painéis à base de madeira, pois a reação entre a ureia e o formaldeído leva a uma reação reversível (FIGURA 2a), resultando em formaldeído livre (PARK; KIM, 2008; HE; ZHANG; WEI, 2012).

O adesivo à base de fenol-formaldeído (FF), ilustrado na Figura 2b, possui grupos mais ativos para reagirem com o formaldeído e a reticulação entre o FF é mais estável (SALTHAMMER; MENTESE; MARUTZKY, 2010 apud HE; ZHANG; WEI, 2012). Portanto, o adesivo a base de UF possui maior teor de formaldeído em relação ao FF, e por serem utilizados em interiores em função da baixa resistência a umidade, podem causar poluição do ambiente (HUN et al., 2010).

Figura 2 – Processo sintético de adesivos de (a) ureia-formaldeído e (b) fenol-formaldeído.



Fonte: Adaptado de He, Zhang e Wei (2012).

### 2.3 Emissões de Formaldeído

Desde a década de 1970, os produtos feitos à base de formaldeído sofreram opressão e foram reduzidas continuamente (SOLT et al., 2019). Em 2004, a IARC classificou o formaldeído como cancerígeno para os seres humanos (Grupo 1) (IARC, 2004). Essa avaliação é baseada em informações sobre a relação entre câncer nasofarínge e leucemia relacionada à exposição ao formaldeído. A discussão se intensificou novamente, pelo mais recente regulamento europeu sobre CLP (classificação, rotulagem e embalagem), que entrou em vigor em 2016, classificando o formaldeído como um composto cancerígeno da categoria 1B (SOLT et al., 2019).

Daí em diante o formaldeído (HCHO) tem sido o maior motivo de preocupação como poluente do ar interno, pois existe em uma ampla gama de produtos e a exposição humana a ele que pode resultar em efeitos adversos à saúde (FIGURA 3). As exposições agudas e crônicas por inalação ao formaldeído em humanos, principalmente crianças, podem resultar em sintomas respiratórios e irritações nos olhos, nariz e garganta (MCGWIN JR.; LIENERT; KENNEDY JR., 2010).

Figura 3 – Efeitos causados à saúde da população em diferentes média de concentração e tempo de exposição à emissão de formaldeído.

<b>Média de concentração</b>	<b>Tempo médio</b>	<b>Efeitos à saúde população geral</b>
0,8 - 1 ppm	Exposições repetidas	Percepção olfativa
até 2 ppm	Única ou repetida exposição	Irritante aos olhos, nariz e garganta
3 – 5 ppm	30 minutos	Lacrimação e intolerância por algumas pessoas
10 – 20 ppm	Tempo não especificado	Dificuldade na respiração e forte lacrimação
25 – 50 ppm	Tempo não especificado	Edema pulmonar, pneumonia, perigo de vida
50 – 100 ppm	Tempo não especificado	Pode causar a morte

Fonte: Adaptado de ANVISA (2014).

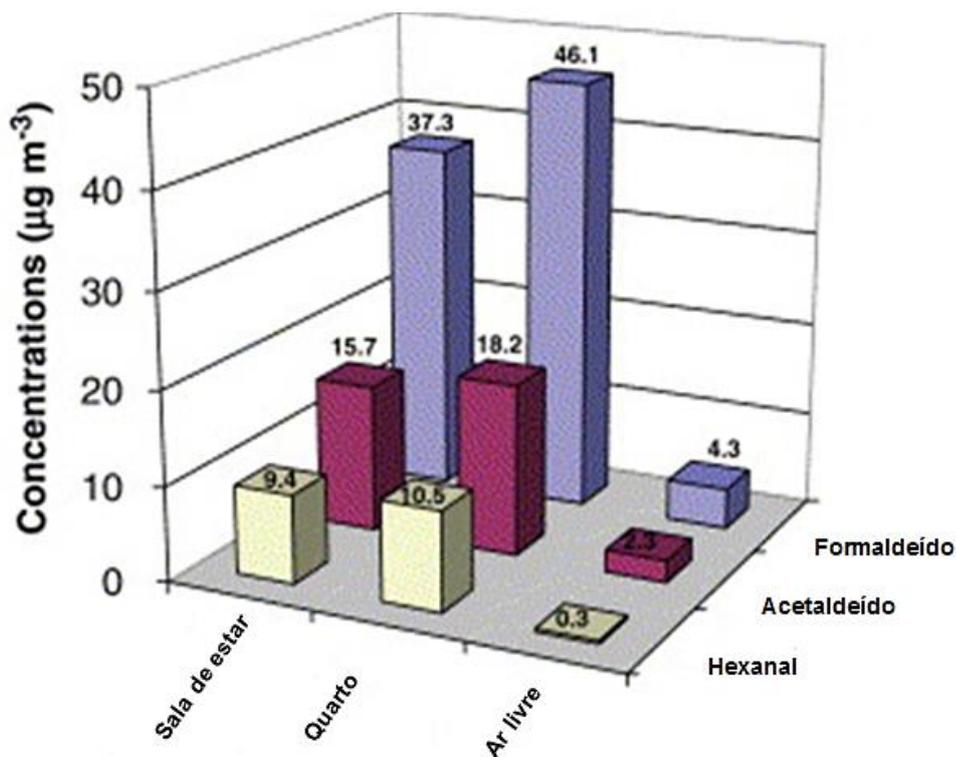
O formaldeído tem sido discutido como um poluente interno típico há décadas (SALTHAMMER, 2019) e, como as pessoas passam a maior parte do tempo dentro de suas casas, poluentes do ar em ambientes fechados têm atraído crescente preocupação devido a seus graves efeitos causado à saúde (ZHUGE et al., 2018), responsáveis por 4,3 milhões de mortes por ano em todo o mundo (OMS, 2014) e contribuem consideravelmente para a carga global de doenças (LANDRIGAN et al., 2017).

As fontes mais significativas de formaldeído no ar em residências e edifícios são provenientes de móveis produzidos com painéis compensados, aglomerados e MDF (fibra de média densidade), compostas por adesivos à base de UF. Vários fatores têm efeitos significativos nos níveis de formaldeído em ambientes fechados, incluindo temperatura, umidade e taxa de ventilação (LIU et al., 2015).

As emissões podem se originar: 1) de formaldeído livre sintético que não é polimerizado na rede e que é emitido durante ou rapidamente após a produção do painel; 2) o formaldeído pode ser liberado devido à hidrólise adesiva, que será emitida ao longo da vida útil do painel, dependendo da umidade e da temperatura; 3) fontes biogênicas (SOLT, et al., 2019).

Um estudo feito por Marchand et al. (2006) mostra que dentre os aldeídos, ou seja, os poluentes químicos internos e externos, o mais abundante no ar é o formaldeído. A Figura 4 mostra as concentrações médias de formaldeído, acetaldeído e hexanal quantificadas na sala de estar, no quarto e no exterior. A concentração média interna de formaldeído é aproximadamente nove vezes maior que a do exterior, enquanto essa proporção apresenta em sete para o acetaldeído. Os altos níveis de formaldeído interno desse estudo resultaram principalmente de produtos de madeira, como materiais para armários, portas de passagem e subpiso de madeira compensada (MARCHAND et al., 2006).

Figura 4 – Concentrações médias de formaldeído, acetaldeído e hexanal quantificadas no ar externo, na sala e no quarto.



Fonte: Adaptado de Marchand et al. (2006).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2002), a menor concentração de formaldeído que foi associada à irritação do nariz e da garganta após exposição em curto prazo é de  $100 \mu\text{g m}^{-3}$ . Portanto, o valor máximo recomendado para uma exposição média de 30 minutos ao formaldeído é de  $100 \mu\text{g m}^{-3}$ .

A emissão de formaldeído é classificada através de limites estabelecidos por países que utilizam painéis (KIM et al., 2006; RISHOLM-SUNDMAN et al., 2007). A Tabela 1 apresenta classificações, limites de emissão e métodos estabelecidos no Brasil, Europa e Japão.

Tabela 1 – Classificações, limites de emissão de formaldeído e métodos estabelecidos em diferentes países.

País	Painel	Norma	Classe	Exigência
Brasil	Aglomerados e MDP	ABNT NBR 14810-2	E1	$\leq 8 \text{ mg} / 100 \text{ g}$
			E2	$> 8 \text{ mg} / 100 \text{ g e} \leq 30 \text{ mg} / 100 \text{ g}$
			E3	$> 30 \text{ e} \leq 60 \text{ mg} / 100 \text{ g}$
Europa	Aglomerados e MDP	EN 13986	E1	$\leq 8 \text{ mg} / 100 \text{ g}$
			E2	$> 8 \text{ e} \leq 30 \text{ mg} / 100 \text{ g}$
Japão	Aglomerados e MDP	JIS A 5908	F****	$0,3 \text{ mg L}^{-1}$
			F***	$\leq 0,5 \text{ mg L}^{-1}$
			F**	$\leq 1,5 \text{ mg L}^{-1}$

Fonte: Adaptado de Bolognesi (2010).

## 2.4 Alternativas de substituição do formaldeído

Nos últimos anos, o desenvolvimento de materiais sustentáveis a partir de recursos renováveis ganhou atenção devido ao rápido esgotamento dos recursos petrolíferos, ao aquecimento global e preocupações ambientais/sociais (PHALAK et al., 2019). Dessa forma o controle da emissão de formaldeído pelo adesivo UF tornou cada vez mais sério visando à melhoria do padrão de vida das pessoas. Nas últimas décadas, muitos esforços foram feitos para diminuir a emissão de formaldeído e melhorar o desempenho do adesivo UF (ZHAO et al., 2018).

Os adesivos de base biológica fornecem uma solução sustentável para as preocupações com formaldeído em aplicações internas, mas também podem ajudar a

indústria de madeira a ser menos dependente de petróleo (HE; WAN, 2017). A partir daí surgiram os adesivos de base biológica que podem ser derivados de materiais naturais usando novas tecnologias, formulações e métodos. Tais adesivos incluem amido (GU et al., 2019), tanino (ARAUJO et al., 2021), lignina (ANG et al., 2019), proteínas (AVERINA et al., 2021), carboidratos (KHOSRAVI et al., 2015), ácido cítrico (YUSOF et al., 2020), óleos insaturados de plantas (ADDIS; KOH; GORDON, 2020), óleo de pirólise (LÚCIO et al., 2017) e produtos liquefeitos (PIZZI, 2006; FERDOSIAN et al., 2017; HE; WAN, 2017).

Liu et al. (2018) estudaram métodos de modificação da resina UF de baixo custo, que seja capazes de reduzir a emissão livre de formaldeído, com boa resistência à água e mantendo um custo comparável; realizaram substituição da UF pura por adesivo de farelo de algodão com até 40% em massa. O adesivo modificado mostrou boa resistência mecânica em comparação com as resinas UF pura, e para os painéis melhores propriedades à tração e no teste inchamento de água. Também mostraram estruturas químicas semelhantes, estabilidade térmica, propriedades reológicas ainda melhores quando comparadas com a resina UF pura e baixo custo.

Porém, o teste de emissão de formaldeído de 10%, 20% e 30% do adesivo de farelo de algodão com a resina de UF com razão molar de 1,45 formaldeído para ureia (F/U) apresentou maior emissão de formaldeído do que a resina UF. Sob essa consideração, a substituição do adesivo de farelo de algodão com UF de razão molar de 1,2 F/U apresentou uma diminuição da emissão de formaldeído dessa resina UF, logo mais experimentos são necessários para chegar a uma conclusão estatística confiável a essa propriedade (LIU et al., 2018).

Akinyemi, Olamide e Oluwasogo (2019) estudaram a possibilidade de modificar o amido de mandioca em pó com glutaraldeído para reduzir sua higroscopicidade, melhorar suas propriedades de ligação e, posteriormente, produzir painéis de partículas sustentáveis. Os resultados obtidos mostraram que resíduos de aparas de madeira de 1,7 mm colados com dosagens de 1,5 e 2,5% do adesivo são aceitáveis para desenvolver painéis de partículas, pois atendem ao padrão industrial japonês mínimo de 2.000 N mm<sup>-2</sup> para MOE e 8 N mm<sup>-2</sup> para o MOR, em termos de resistência mecânica.

Logo, os painéis aglomerados com amido de mandioca modificado apresentaram boas perspectivas de utilização, apresentando melhor desempenho do que os painéis aglomerados sem modificação. Sendo assim, o uso de amido de mandioca modificado

como aglutinante na produção industrial de painéis de partículas deve ser incentivado a utilizar os resíduos gerados durante o processamento da mandioca e do processamento da madeira, que são abundantes (AKINYEMI; OLAMIDE; OLUWASOGO, 2019).

Os adesivos à base de taninos têm sido estudados por muitos pesquisadores nos últimos 30 anos (LI et al., 2016), porém os estudos apresentam algumas desvantagens do tanino. Dentre essas desvantagens, foi identificada, uma menor resistência dos compósitos, menor tempo de armazenamento do adesivo, maior tempo de cura e maior custo econômico do que os simples adesivos de FF em aplicação (PIZZI; SCHARFETTER, 1978). Ainda assim, os adesivos para madeira de taninos estão se tornando cada vez mais interessantes porque possuem reatividade semelhante e química de reticulação com formaldeído como sistemas de fenol e resorcinol-formaldeído (VAN LANGENBERG; GRIGSBY; RYAN, 2010).

Conforme Tahir, Halip e Lee (2019), o tanino extraído de várias fontes naturais mostrou grande potencial a ser usado na síntese de adesivos de madeira que não agridem o meio ambiente. No entanto, no estado atual da pesquisa, é impossível substituir completamente os adesivos tradicionais à base de petróleo, pois o tanino só poderia atuar como fortificador devido à restrição de viscosidade que limita o nível de substituição nas resinas sintéticas. Portanto, é importante observar que todas as tecnologias consideradas sustentáveis consistem na substituição parcial do componente derivado do petróleo ou o material renovável foi quimicamente modificado com petroquímicos.

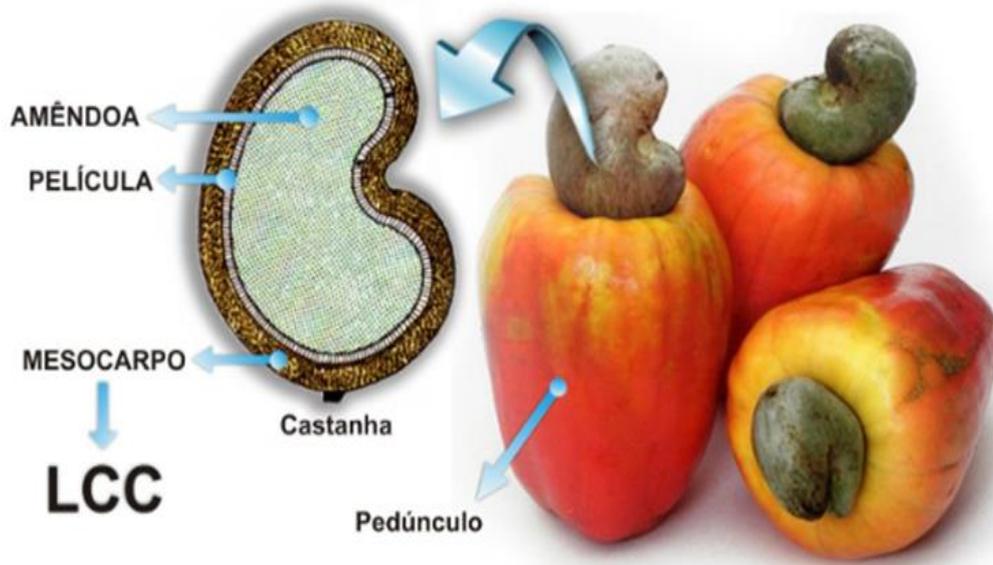
Consequentemente, houve uma crescente atenção internacional para a produção e o uso de adesivos sustentáveis devido a vários fatores. Mudanças legislativas no governo foram impostas à sociedade, para minimizar os efeitos na saúde da população de diante às emissões de produtos voláteis, produtos químicos orgânicos, principalmente o formaldeído, e incentivaram uso de materiais renováveis como um substituto econômico para produtos petroquímicos (TAHIR; HALIP; LEE, 2019).

#### **2.4.1 Líquido da castanha de caju**

O cajueiro nativo do Nordeste tem como fruto a castanha-de-caju (FIGURA 5), no qual está conectado ao pedúnculo (um pseudofruto). O fruto é composto na sua parte interna pela amêndoa que é amplamente utilizada na culinária; por uma película envoltória e pelo mesocarpo onde se encontra o líquido escuro, cáustico e inflamável: o líquido da

castanha de caju (LCC), conhecido internacionalmente como *cashew nut shell liquid* (CNSL) (ASSIS, 2010). Em 2017 o Brasil situou-se como nono principal produtor de castanha de caju com casca, com produção de 133,6 mil toneladas. Já a sua produção no ano de 2019 foi de aproximadamente 139 mil toneladas (CONAB, 2020).

Figura 5 – Representação da localização do LCC a partir do caju.

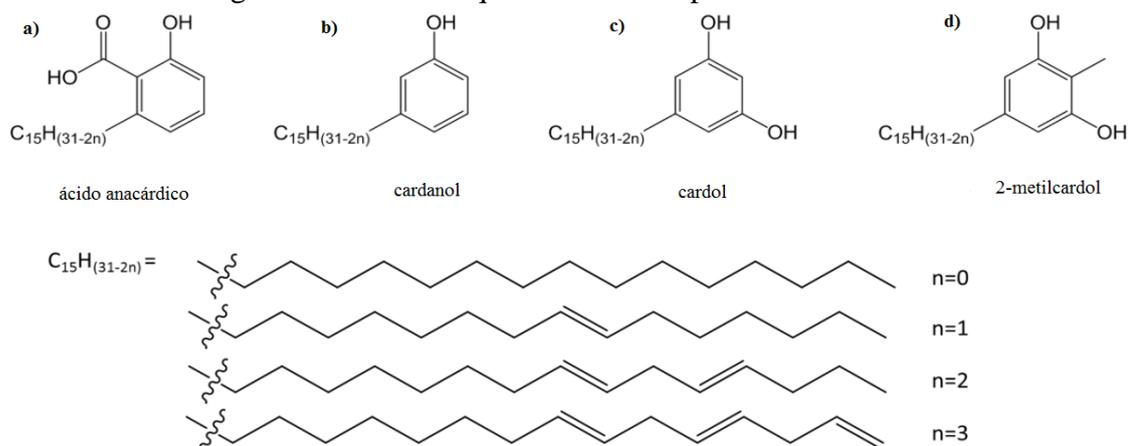


Fonte: Assis (2010).

O líquido da casca de castanha de caju (LCC) é uma fonte natural exclusiva para fenóis de cadeia longa não saturada. É um material barato e renovável, obtido como subproduto da indústria do caju (LUBI; THACHIL, 2000). O LCC é um líquido viscoso, marrom avermelhado, encontrado no mesocarpo da castanha de caju, no qual pode ser classificado em dois tipos: natural e técnico (SANJEEVA et al., 2014).

Conforme o mesmo autor, o LCC natural é tipicamente extraído com solvente, no qual é composto por: ácido anacárdico (60-70%), cardol (15-20%), cardanol (10%) e traços de 2-metilcardol (FIGURA 6). Quando obtido como resíduo do processo industrial de torrefação, que emprega temperaturas elevadas, o ácido anacárdico sofre uma reação de descarboxilação e o LCC é considerado o líquido técnico destilado da casca de castanha de caju (DT-LCC), que contém principalmente cardanol (60-70%), cardol (15-20%), material polimérico (10%) e vestígios de 2-metilcardol.

Figura 6 – Estrutura química dos componentes do LCC.



Legenda: a) ácido anacárdico; b) cardanol; c) cardol; d) 2-metilcardol.

Fonte: Adaptado de Puchot (2016).

## 2.4.2 Cardanol

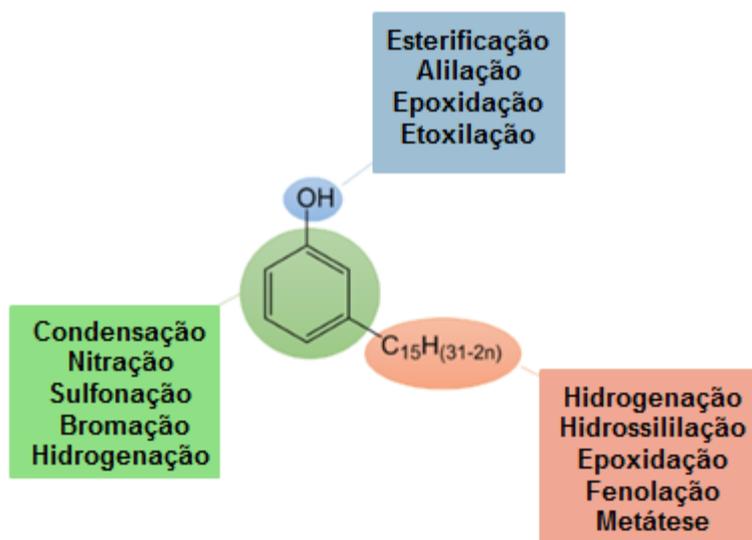
O cardanol é uma fonte renovável aromática promissora, no qual representa uma alternativa natural aos fenóis derivados do petróleo (CAILLOL, 2018). É considerado um dos exemplos mais interessantes de matéria-prima sustentável derivada de plantas, sendo o principal constituinte do LCC, um subproduto obtido da castanha-de-caju (*Anacardium occidentale* L.), cuja composição final depende do método de extração (FONTANA et al., 2019).

Esta substância apresenta potencial para ser utilizado na produção de adesivos à base de madeira. Sua dupla natureza, núcleos fenólicos e cadeia de ácidos graxos insaturados, torna uma matéria-prima potencial natural para a síntese de adesivos e polímeros resistentes à água (PIZZI, 2006). Conforme Puchot (2016), os três locais reativos disponíveis no cardanol (FIGURA 7) permitem a síntese de vários tipos de polímeros à base de cardanol. Além disso, a presença da cadeia alquila, carbono-15, confere propriedades hidrofóbicas ao material, bem como flexibilidade devido à plastificação interna.

Esse material apresenta, portanto, peculiaridades em suas características químicas e físico-químicas, sua posição de dupla ligação permite inúmeras funcionalizações, além das usuais do anel fenólico e características específicas a seus derivados (antioxidante, resistência à chama e hidrofobicidade). O cardanol não possui cheiro agressivo, apresenta baixa volatilização e ponto de ebulição mais alto que os demais compostos fenólicos

derivados do petróleo, favorecendo assim a saúde de quem o manuseia e a do meio ambiente (MAZZETTO; LOMONACO; MELE, 2009).

Figura 7 – Sítios ativos na estrutura química do cardanol.



Fonte: Adaptado de Puchot (2016).

Conforme a Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, 2002), uma das principais características do cardanol como matéria-prima renovável e intermediário químico é sua não toxicidade. Testes realizados comprovam sua biodegradabilidade: 96% (28 dias) – (OECD-302C); solubilidade em água igual a 1,0 g/L; ecotoxicidade (96 h): ecotoxicidade (96 h) – peixe < 11 g/L; dáfias < 66 g/L; algas < 1 g/L – (OECD-425) e gen-toxicidade-negativo com testes empregando *Ames Salmonella*.

Os adesivos de cardanol, no entanto, eram conhecidos no passado, mas seu uso não era muito extenso, simplesmente porque a própria matéria-prima era cara. O preço, por sua vez, parece ser mais atraente agora, já que existem extensas plantações de cajueiro (PIZZI, 2006). Conforme o mesmo autor geralmente modificações com fenol, resorcionol, grupo e/ou as ligações duplas na cadeia podem ser usados diretamente para formar redes endurecidas. Essas modificações requerem várias etapas de reação, tornando o processo muito caro para a exploração comercial em adesivos de madeira.

Um exemplo é o sistema de ozonólise, em seu primeiro passo de reação produz o produto principal chamado hidroperóxido de cardanol que, após redução por glicose ou por zinco/ácido acético, produz uma alta proporção de grupos cardanolaldeído. Esses grupos se cruzam com os grupos aromáticos do próprio cardanol, e ocorre uma auto condensação do sistema, produzindo redes endurecidas (TOMKINSON, 2002).

Com esse potencial, foi realizado testes para verificar a qualidade do adesivo em painéis aglomerados, no qual foram comparados com painéis controle de FF. Os resultados encontrados mostraram que os painéis com fenol-formaldeído apresentaram ligação interna de 5,55 MPa e para a força de ligação interna seca de 0,69 MPa. Já os painéis com o adesivo cardanol-aldeído (zinco/acético reduzido) foram de 6,77 MPa e 1,05 MPa, respectivamente. Diante os resultados, o que justificaria se seria viável ou não seria avaliar o custo da ozonólise para adesivos de madeira com baixo custo e, também, se os tempos de prensagem podem coincidem com os adesivos industriais (PIZZI, 2006).

### **2.4.3 Estudos de adesivos à base de cardanol**

A natureza fenólica do cardanol permite reação com formaldeído sob várias condições para formar adesivos novolac ou resol (IKEDA et al., 2000; PAPADOPOULOU; CHRISAFIS, 2011). Em comparação com adesivos fenólicos convencionais, os adesivos cardanol-formaldeído melhoraram a flexibilidade (devido ao efeito de “plastificação interna”) da cadeia C-15, levando a uma melhor processabilidade. A cadeia lateral transmite uma natureza hidrofóbica ao polímero, tornando-o repelente à água e resistente ao intemperismo (VOIRIN et al., 2013).

O cardanol, entretanto, condensa com formaldeído, produzindo uma rede de polímeros semelhante às resinas FF (SANTOS et al., 2010), se tornando, portanto, um adesivo promissor a fim diminuir a emissão de formaldeído. O caráter fenólico do cardanol e a insaturação em sua cadeia lateral alquílica hidrofóbica permite também uma reação para a produção de adesivos epóxi. A presença do grupo alquila na estrutura química do cardanol, introduz flexibilidade de cadeia para uso como poliamidas ou poliaminas como agentes de cura, para modificar o desempenho de adesivos epóxi (ATTA et al., 2017).

Assim como o formaldeído e o epóxi, o cardanol é um bom precursor para a síntese de adesivos poliuretânicos (PU), devido sua fácil conversão em composto poliol. Podendo ser utilizado para atuante de modificação para obter polióis, através de reação do grupo hidroxila do cardanol ou por condensação no anel fenólico. Puchot (2016) comprova o uso de derivados de cardanol para a elaboração de materiais de PU com propriedades térmicas e mecânicas aprimoradas.

Chuayjuljit, Rattanametangkool e Potiyaraj (2006) realizaram a preparação do adesivo cardanol-formaldeído a partir LCC para reforçar a borracha natural. A

polimerização do adesivo foi feita por condensação na presença de catalisadores de base e ácido, no qual desenvolveram adesivos do tipo resol e novalac. Eles perceberam que os adesivos eram compatíveis com borracha natural em várias formulações e indicaram melhorias significativas nas propriedades mecânicas como dureza, resistência à tração, módulo de alongamento a 100 e 300% e abrasão resistência. As cadeias laterais alifáticas do cardanol reduziram o efeito polar dos adesivos fenólicos e, portanto, aumentam a compatibilidade com a borracha. Além disso, as longas cadeias laterais do cardanol conferiram flexibilidade por causa da “plastificação interna”.

Shukla, Srivastava e Srivastava (2015) realizaram estudos sobre as propriedades térmica, mecânica e química de polímeros derivados de recursos naturais. Foi utilizado o adesivo epóxi à base de cardanol que foram sintetizadas por reação fenólica do tipo resol e da epicloridrina em meio básico, a 120 °C. Os adesivos fenólicos do tipo resol foram sintetizadas por reação de cardanol (C) e formaldeído (F) na presença de hidróxido de sódio, como catalisador, em cinco temperaturas diferentes. As amostras preparadas foram curadas com poliamida a 15% como agente de cura a  $120 \pm 2$  °C por 1 h.

As características de resistência mecânica e química das amostras preparadas foram avaliadas para avaliar a possibilidade de usar esses adesivos termoendurecíveis como um novo material ecológico para aplicações de engenharia. Após avaliação, verificou-se que os sistemas de adesivos preparados exibem melhores propriedades em comparação com o adesivo epóxi comercial em termos de aumento da resistência à tração, alongamento à ruptura e resistência ao impacto, de peças fundidas e brilho, dureza, aderência e flexibilidade dos filmes. As propriedades anticorrosivas da resistência química dos sistemas dos adesivos preparados são superiores aos adesivos epóxis não modificados (SHUKLA; SRIVASTAVA. SRIVASTAVA, 2015).

Já Hu et al. (2019) realizaram a síntese de um novo adesivo de acrilato de poliuretano curável por UV à base de cardanol (C-PUA). Os adesivos passaram por diversas caracterizações, como viscosidade, gel-time, entre outros e suas estruturas químicas foram observadas por infravermelho de Fourier. As propriedades finais mostraram excelente desempenho, incluindo uma temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) de 74-123 °C, temperatura máxima de degradação térmica de 437-441 °C, resistência à tração de 12,4-32,0 MPa, módulo de tração de 107,2-782,7 MPa e adesão do revestimento. Os pesquisadores concluíram que os adesivos de C-PUA desenvolvido apresentou grande potencial para serem aplicadas em materiais como revestimentos.

Vinod e Anandajothi (2020) estudaram um compósito biodegradável, utilizando o adesivo cardanol-formaldeído como matriz e as fibras de abaca e rosela como reforço. A resistência à tração e à flexão foi aumentada com a adição da fibra de abaca e rosela reforçada com o adesivo (CF) em comparação com outros compósitos híbridos. O cardanol-formaldeído cumpriu todas as condições e requisitos, tais como maiores resistências, temperatura de distorção de calor e leveza com baixo custo. Este tipo de material pode ser amplamente utilizado em varas de pesca, tacos de golfe, cadeiras, mesas e todos os fins domésticos.

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Por meio da revisão apresentada neste capítulo, observa-se que diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas visando melhorar a qualidade dos compósitos, com foco principalmente em adesivos naturais para que eles sejam capazes de substituir totalmente ou parcialmente os adesivos sintéticos, a um custo menor e com menor emissão de formaldeído.

Acredita-se que o presente trabalho poderá contribuir no entendimento da produção de painéis aglomerados com adesivos de origem natural, em associação com a ureia-formaldeído, evidenciando, assim, o cardanol como um possível adesivo para produção de painéis aglomerados a fim de reduzir os problemas ambientais, beneficiar a saúde da população e diversificar a matéria-prima das indústrias de painéis reconstituídos.

## REFERÊNCIAS

ADDIS, C. C.; KOH, R. S.; GORDON, M. B. Preparation and characterization of a bio-based polymeric wood adhesive derived from linseed oil. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 102, p. e102655, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Informe Técnico N° 53**. 2014. Disponível em: <<https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/alimentos/informes-anexos/54de2014/arquivos/513json-file-1>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

AKINYEMI, B. A.; OLAMIDE, O.; OLUWASOGO, D. Formaldehyde free particleboards from wood chip wastes using glutaraldehyde modified cassava starch as binder. **Case Stud. Constr. Mater.**, v. 11, p. e00236, 2019.

ALTGEN, D.; GRISBY, W.; ALTGEN, M.; RAUTKARI, L.; MAI, C. Analyzing the UF resin distribution in particleboards by confocal laser scanning microscopy. **Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.**, v. 125, p. e105529, 2019.

ANG, A. F.; ASHAARI, Z.; LEE, S. H.; TAHIR, P. M.; HALIS, R. Lignin-based copolymer adhesives for composite wood panels – A review. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 95, p. e102408, 2019.

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. **Revista Gestão Industrial**, v. 15, n. 1, p. 197-211, 2019.

ARAUJO, E. S.; LORENÇO, M. S.; ZIDANES, U. L.; SOUSA, T. B.; MOTA, G. S.; REIS, V. N. O.; SILVA, M. G.; MORI, F. A. Quantification of the bark *Myrcia eximia* DC tannins from the Amazon rainforest and its application in the formulation of natural adhesives for wood. **J. Clean. Prod.**, v. 280, p. e124324, 2021.

ASSIS, H. M. **Síntese de substâncias de interesse tecnológico a partir do óleo de mamona e do líquido da casca da castanha de caju (LCC)**. 2010. 78 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2010.

ATTA, A. M.; AL-HODAN, M. A.; HAMEED, R. S. A.; EZZAT, A. O. Preparation of green cardanol-based epoxy and hardener as primer coatings for petroleum and gas steel in marine environment. **Prog. Org. Coat.**, v. 111, p. 283-293, 2017.

AVERINA, E.; KONNERTH, J.; D'AMICO, S.; VAN HERVIJNEN, H. W. G. Protein adhesives: Alkaline hydrolysis of different crop proteins as modification for improved wood bonding performance. **Ind. Crops Prod.**, v. 161, p. e113187, 2021.

BIAZUS, A.; HORA, A. B.; LEITE, B. G. P. Panorama de mercado: painéis de madeira. **BNDES Setorial**, v. 32, p.49-90, 2010.

BOLOGNESI, L. **Quantificação de formaldeído em extrato aquoso obtido da emissão de painéis de madeira por espectrofotometria acoplada à injeção em fluxo.** 2010. 52 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

BORYSIUK, P.; JENCZYK-TOLLOCKKO, I.; AURIGA, R.; KORDZIKOWSKI, M. Sugar beet Pulp as raw material for particleboard production. **Ind. Crops Prod.**, v. 141, p. e111829, 2019.

CAILLOL, S. Cardanol: A promising building block for biobased polymers and additives. **Curr. Opin. Green Sustain. Chem.**, v. 14, p. 26-32, 2018.

CARVALHO, A. G.; LELIS, R. C. C.; NASCIMENTO, A. M. Avaliação de adesivos à base de taninos de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* e de *Acacia mearnsii* na fabricação de painéis aglomerados. **Ciênc. Florest.**, v. 24, n. 2, p. 479-489, 2014.

CARVALHO, L. H.; MAGALHÃES, F. D.; FERRA, J. Formaldehyde emissions from woodbased panels: Testing methods and industrial perspectives. In: CHENG, C. B.; LN, F. H. (Eds.). **Formaldehyde: Chemistry, Applications and Role in Polymerization**, Hauppauge, NY: Nova Science Publishers Inc., 2012. pp. 1-43.

CHUAYJULJIT, S.; RATTANAMETANGKOOL, P.; POTIYARAJ, P. Preparation of cardanol-formaldehyde resins from cashew nut shell liquid for the reinforcement of natural rubber. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 104. p.1997-2002, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Culturas Regionais – Castanha de Caju, Análise Mensal.** Fevereiro/2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-castanha-de-caju>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

EBNESAJJAD, S.; LANDROCK, A. H. Introduction and Adhesion Theories. In: EBNESAJJAD, S.; LANDROCK, A. H. **Adhesives Technology Handbook**. 3rd Ed. in Norwich, NY: William Andrew, 2015. pp. 1-18.

FERDOSIAN, F.; PAN, Z.; GAO, G.; ZHAO, B. Bio-Based Adhesives and Evaluation for Wood Composites Application. **Polymers**, v. 9, n. 2, p. 1-29, 2017.

FONTANA A. GUERNELLI, S.; CRESCENZO, A. D.; PROFIO, P. D.; PALOMBA, F.; CRESCENTINI, L. D.; BASCHIERI, A.; AMORATI, R. Cardanol-like co-surfactants solubilized in pegylated micelles keep their antioxidant activity and preserve polyethylene glycol chains from oxidation. **J. Mol. Liq.**, v. 293, p. 1-9, 2019.

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.

FRIHART, C. R. Introduction to special issue, wood adhesives: past, present, and future. **For. Prod. J.**, v. 65, p. 4-8, 2015.

GRUENER, J. T.; VASHISTH, A.; POSPISIL, M. J.; CAMACHO, A. C.; OH, J.-H.; SOPHIEA, D.; MASTROIANNI, S. E.; AUVIL, T. J.; GREEN, M. J. Local heating and curing of carbon nanocomposite adhesives using radio frequencies. **J. Manuf. Process.**, v. 58, p. 436-442, 2020.

GU, K.; HUANG, J.; LI, K. Preparation and evaluation of particleboard bonded with a soy flour-based adhesive with a new curing agent. **J. Adhes. Sci. Technol.**, v. 27, p. 2053-2064, 2013.

GU, Y.; CHENG, L.; GU, Z.; HONG, Y.; LI, Z.; LI, C. Preparation, characterization and properties of starch-based adhesive for wood-based panels. **Int. J. Biol. Macromol.**, v. 134, p. 247-254, 2019.

HE, Z.; WAN, H. Bio-based wood adhesives research: Advances and outlooks. In: HE, Z. (Ed.). **Bio-Based Wood Adhesives: Preparation, Characterization, and Testing**. Boca Raton, FL: CPC Press, 2017. pp. 340-353.

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.

HU, Y.; SCHANG, Q.; BO, C.; JIA, P.; FENG, G.; ZHANG, F.; LIU, C.; ZHOU, Y. Synthesis and Properties of UV-Curable Polyfunctional Polyurethane Acrylate Resins from Cardanol. **ACS Omega**, v. 4, n. 7, p. 12505-12511, 2019.

HUN, D. E.; CORSI, R. L.; MORANDI, M. T.; SIEGEL, J. A. Formaldehyde in residences: long-term indoor concentrations and influencing factors. **Indoor Air**, v. 20, n. 3, p. 196-203, 2010.

IKEDA, R.; TANAKA, H.; UYAMA, H.; KOBAYASHI, S. Enzymatic Synthesis and Curing of Poly(cardanol). **Polym. J.**, v. 32, p.589–593, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES. **Painéis de madeira**. 2017. Disponível em: <<https://iba.org/paineis-de-madeira>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **Press Release No.153: IARC classifies formaldehyde as carcinogenic to humans**. Lyon, 2004. Disponível em: <<https://www.iarc.who.int/pageroot/PRELEASES/pr153a.html>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

IWAKIRI, S. **Painéis de Madeira Reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

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, 2012.

JANG, Y.; HUANG, J.; LI, K. A new formaldehyde-free wood adhesive from renewable materials. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 31, p. 754-759, 2011.

KANEHASHI, S.; MASUDA, R.; YOKOYAMA, K.; KANAMOTO, T.; NAKASHIMA, H.; MIYAKOSHI, T. Development of a cashew nut shell liquid (CNSL)-based polymer for antibacterial activity. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 132, p. e42725, 2013.

KHOSRAVI, S.; KHABBAZ, F.; NORDQVIST, P.; JOHANSSON, M. Protein-based adhesives for particleboards. **Ind. Crop Prod.**, v. 32, n. 3, p. 275-283, 2010.

KHOSRAVI, S.; NORDQVIST, P.; KHABBAZ, F.; ÖHMAN, C.; BJURHAGER, I.; JOHANSSON, M. Wetting and film formation of wheat gluten dispersions applied to wood substrates as particle board adhesives. **Eur. Polym. J.**, v. 67, p. 476-482, 2015.

KIM, S.; KIM, J.-A.; KIM, H.-J.; KIM, S. D. Determination of formaldehyde and TVOC emission factor from wood-based composites by small chamber method. **Polym. Test.**, v. 25, v. 5, p.605-614, 2006.

LANDRIGAN, P. J. et al. The Lancet Commission on pollution and health. **The Lancet**, v. 391, p. 462-512, 2017.

LI, C.; ZHANG, J.; YI, Z.; YANG, H.; ZHAO, B.; ZHANG, W.; LI, J. Preparation and characterization of a novel environmentally friendly phenol–formaldehyde adhesive modified with tannin and urea. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 66, p. 26-32, 2016.

LIU, M.; WANG, Y.; WU, Y.; HE, Z.; WAN, H. “Greener” adhesives composed of urea-formaldehyde resin and cottonseed meal for wood-based composites. **J. Clean. Prod.**, v. 187, p. 361-371, 2018.

LIU, X.; MASON, M. A.; GUO, Z.; KREBS, K. A.; ROACHE, N. F. Source emission and model evaluation of formaldehyde from composite and solid wood furniture in a full-scale chamber. **Atmos. Environ.**, v. 122, p. 561-568, 2015.

LOPEZ, C. A. A.; LIMA, K. R. S.; MANNO, M. C; TAVARES, F. B.; FERNANDES NETO, D. L.; JESUS, M. L. C.; VIANA, M. A. O.; FONSECA, L. A. B. Effects of cashew nut shell liquid (CNSL) on the performance of broiler chickens. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, v. 64, n. 4, p. 1027-1035, 2012.

LUBI, M. C.; THACHIL, E. B. Cashew nut shell liquid (CNSL) – a versatile monomer for polymer synthesis. **Des. Monomers. Polym.**, v. 3, p. 123-153, 2000.

LÚCIO, D. M.; PIMENTA, A. S.; CASTRO, R. V. O.; COSTA, F. S. L.; SANTOS, R. C.; LIMA, K. M. G. Phenolic adhesives based on eucalyptus pyrolytic oil: Effect of urea addition on synthesis and properties. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 75, p. 57-65, 2017.

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.

MARCHAND, C.; BULLIOT, B.; CALVÉ, S. L.; MIRABEL, Ph. Aldehyde measurements in indoor environments in Strasbourg (France). **Atmos. Environ.**, v. 40, p. 1336-1345, 2006.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding: principles and practice**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

MATTOS, R. L.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. **Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas**. Rio de Janeiro: BNDS Setorial, 2008, v. 27, p. 121-156.

MAZZETTO, S. E; LOMONACO, D; MELE, G. Óleo da castanha de caju: oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial. **Quím. Nova**, v. 32, n. 3, p. 732-741, 2009.

MCGWIN JR., G.; LIENERT, J.; KENNEDY JR., J. I. Formaldehyde Exposure and Asthma in Children: A Systematic Review. **Environ. Health Perspect.**, v. 118, n. 3, p. 313-317, 2010.

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

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.

NURYAWAN, A.; RAHMAWATY; TAMBUM, K. D. S.; RISNASARI, I.; MASRUCHIN, N. Hydrolysis of particleboard bonded with urea-formaldehyde resin for recycling, **Heliyon**, v. 6, n. 5, p. e03936, 2020.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Test Plan for Cashew Nut Shell Liquid**, 2002. Disponível em: < <https://www.yumpu.com/en/document/read/8969779/cardolite-test-plan-for-cashew-nut-shell-liquid-us-environmental-> >. Acesso em: 18 jun. 2020.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Health and the environment: addressing the health impact of air pollution**. Executive Board, n. 135, 2014. 4 p. Disponível em: < <https://apps.who.int/iris/handle/10665/176781> >. Acesso em: 18 jun. 2020.

PAPADOPOULOU E., CHRISAFIS, K. Thermal study of phenol-formaldehyde resin modified with cashew nut shell liquid. **Thermochim. Acta**, v. 512, p. 105-109, 2011.

PAPADOPOULOU, E.; KOUNTOURAS, S.; NIKOLAIDOU, Z.; CHRISAFIS, K.; MICHAIOF, C.; KALOGIANNIS, K.; LAPPAS, A. A. Urea-formaldehyde (UF) resins prepared by means of the aqueous phase of the catalytic pyrolysis of European beech wood. **Holzforschung**, v. 70, n. 12, p. 1139-1145, 2016.

PARK, B. D.; KIM, J. W. Dynamic mechanical analysis of urea-formaldehyde resin adhesives with different formaldehyde-to-urea molar ratios. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 108, p. 2045-2051, 2008.

PHALAK, G.; PATIL, D.; PATIL, A.; MHASKE, S. Synthesis of acrylated cardanol diphenyl phosphate for UV curable flame-retardant coating application. **Eur. Polym. J.**, v. 121, p. e109320, 2019.

PIERRE, F. C.; BALLARIN, A. W.; PALMA, H. L. Caracterização física de painéis aglomerados de *Eucalyptus grandis* com adição de resíduos industriais madeireiros. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 321-328, 2014.

PIZZI A. Wood products and green chemistry. **Ann. For. Sci.**, v. 73, p. 185-203, 2016.

PIZZI, A.; SCHARFETTER, H. The chemistry and development of tannin-based adhesives for exterior plywood. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 22, p. 1745-1761, 1978.

PIZZI. A. Recent developments in eco-efficient bio-based adhesives for wood bonding: opportunities and issues. **J. Adhes. Sci. Technol.**, v. 20, n. 8, p. 829-846, 2006.

PUCHOT, L. **Cardanol: a bio-based building block for new sustainable and functional materials**. 2016. 198 p. Tese (Doutorado em Química de Materiais) – Université de Cergy Pontoise, França, 2016.

RISHOLM-SUNDMAN, M.; LARSEN, A.; VESTIN, E.; WEIBULL, A. Formaldehyde emission – Comparison of different standard methods. **Atmos. Environ.**, v. 41, p. 3193-3202, 2007.

SALTHAMMER, T. Data on formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. **Data Brief**, v. 22, p. 400-435, 2019.

SALTHAMMER, T.; MENTESE, S.; MARUTZKY, R. Formaldehyde in the Indoor Environment. **Chem. Rev.**, v. 110, n. 4, p. 2536-2572, 2010.

SANJEEVA, S. K. et al. Distilled technical cashew nut shell liquid (DT-CNSL) as an effective biofuel and additive to stabilize triglyceride biofuels in diesel. **Renew. Energy**, v. 71, p. 81-88, 2014.

SANTOS, R. S.; SOUZA, A. A.; PAOLI, M.-A. D.; SOUZA, C. M. L. Cardanol-formaldehyde thermoset composites reinforced with buriti fibers: Preparation and characterization. **Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.**, v. 41, n. 9. P. 1123-1129, 2010.

SELLERS, T. Wood adhesive innovations and applications in North America. **For. Prod. J.**, v. 51, n. 6, p. 12-22, 2001.

SHUKLA, S. K.; SRIVASTAVA, K.; SRIVASTAVA, D. Studies on the Thermal, Mechanical and Chemical Resistance Properties of Natural Resource Derived Polymers. **Mat. Res.**, v. 18, n. 6, p. 1217-1223, 2015.

SILVA, D. A. L.; LAHR, F. A. R.; VARANDA, L. D.; CHRISTOFORO, A. L.; OMETTO, A. R. Environmental performance assessment of the melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin manufacture: a case study in Brazil. **J. Clean. Prod.**, v. 96, p. 299-307, 2015.

SOLT, P.; KONNERTH, J.; GINDL-ALTMUTTER, W.; KANTNER, W.; MOSER, J.; MITTER, R.; VAN HERWIJNEN, H. W. G. Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 94, p. 99-131, 2019.

SORATTO, D. N.; CUNHA, A. B.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; COSTA, F. R. Efeitos da adição de cavaco com casca na qualidade de painéis MDP produzidos com *Eucalyptus* sp. **Braz. J. Wood Sci.**, v. 4, n. 1, p. 46-59, 2013.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. P. L. Panorama do sistema construtivo moldura em madeira leve no Brasil. **Ambiente. constr.**, v. 18, n. 3, p. 309-326, 2018.

STOFFEL, R. B.; FELISSIA, F. E.; CURVELO, A. A. S.; GASSA, L. M.; AREA, M. C. Optimization of sequential alkaline-acid fractionation of pine sawdust for a biorefinery. **Ind. Crops Prod.**, v. 61, p. 160-168, 2014.

SURDI, P. G. **Aproveitamento de resíduos do processamento mecânico de madeiras amazônicas para a produção de painéis aglomerados de alta densificação**. 2015. 200 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

TAHIR, P. M.; HALIP, J. A.; LEE, S. H. Tannin-Based Bioresin as Adhesives. In: ARIFFIN, H.; SAPUAN, S. M.; HASSAN, M. A. **Lignocellulose for Future Bioeconomy**. Amsterdam: Elsevier Press, 2019. pp. 109-133.

THOEMEN, H.; IRLE, M.; SERNEK, M. **Wood-based Panels: An Introduction for Specialists**. London: Brunel University Press, 2010. 287 p.

TOMKINSON, J. Adhesives based on natural resources. In: DUNKY, M.; PIZZI, A.; VAN LEEMPUT, M. (Eds.). **Wood adhesion and glued products: wood adhesives**. Brussels: European Commission, Directorate General for Research, 2002. pp. 46-65.

VAN LANGENBERG, K.; GRIGSBY, W.; RYAN, G. **Green adhesives: options for the Australian industry summary of recent research into green adhesives from renewable materials and identification of those that are closest to commercial uptake**. Melbourne: Forest & Wood Products Australia Limited. Project No. PNB158-0910, FWPA, 2010.

VINOD, B.; ANANDAJOTHI, M. Mechanical and tribological properties of abaca-roselle/cardanol formaldehyde hybrid composites. **Mater. Res. Express**, v. 6, p. e125363, 2020.

VITAL, B. R.; ANDRADE, P. I. L.; CARNEIRO, A. C. O.; CABRAL, C. P. T.; CARVALHO, A. M. M. Estabilidade dimensional e resistência a tração perpendicular de painéis fabricados com partículas termorretificadas oriundas de embalagens de *Pinus* sp. **Rev. Árvore**, v. 38, n. 5, p. 951-959, 2014.

VOIRIN, C.; CAILLOL, S.; SADAVARTE, N. V.; TAWADE, B. V.; BOUTEVIN, B.; WADGAONKAR, P. P. Functionalization of cardanol: towards biobased polymers and additives. **Polym. Chem.**, v. 5, p. 3142-3162, 2013.

WOOD TECHNOLOGY. **Classificação – tipos de painéis**. 2007. Disponível em: <<http://files.woodtechnology.webnode.com.br/200000611-2548e26432/Aula%2007.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

YUSOF, M.; LAMAMING, J.; HASHIM, R.; YHAYA, M. F.; SULAIMAN, O.; SELAMAT, M. E. Flame retardancy of particleboards made from oil palm trunk-poly(vinyl) alcohol with citric acid and calcium carbonate as additives. **Constr. Build. Mater.**, v. 263, p. e120609, 2020.

ZHAO, X.; PENG, L.-Q.; WANG, H.-L.; WANG Y.-B.; ZHANG, H. Environment-friendly urea-oxidized starch adhesive with zero formaldehyde-emission. **Carbohydr. Polym.**, v. 181, p. 1112-1118, 2018.

ZHUGE, Y. et al. Residential risk factors for childhood pneumonia: a cross-sectional study in eight cities of China. **Environ. Int.**, v. 116, p. 83-91, 2018.

## SEGUNDA PARTE: ARTIGO

### QUALIDADE DE PAINÉIS AGLOMERADOS PRODUZIDOS COM ADESIVO A BASE DE UREIA FORMALDEÍDO ASSOCIADO COM CARDANOL

#### RESUMO

Este estudo objetivou avaliar a qualidade de painéis aglomerados produzidos em escala laboratorial utilizando o cardanol em substituição ao adesivo ureia-formaldeído (UF). Foram utilizadas diferentes porcentagens do cardanol, totalizando cinco tratamentos de 0, 20, 40, 60 e 80% de cardanol. Os painéis foram produzidos com partículas de *Pinus oocarpa* e densidade nominal de 0,75 g/cm<sup>3</sup>. O colchão formado foi pré-prensado na prensa manual em temperatura ambiente, com pressão de 2 MPa e posteriormente prensado a quente, com temperatura de 160 °C, pressão de 4 MPa, em quinze minutos. Para os adesivos foram avaliados as propriedades físicas e químicas. E para os painéis, foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas, a avaliação interface madeira-adesivo (MEV) e o teste de combustibilidade. Por meio dos resultados obtidos, observou-se que a substituição do cardanol pela UF, ocasionou melhoria na umidade dos painéis. Já para a absorção de água (AA), inchamento em espessura (IE) e taxa de não retorno de espessura (TNRE) os valores médios aumentaram com a substituição da UF pelo cardanol, devido à falta de adesão às partículas com o acréscimo do cardanol aos painéis. Os resultados indicam que é possível uma substituição em até 47% do cardanol para o IE. Para as propriedades mecânicas, de acordo com a norma CS 236-66 (1968) é aceitável uma substituição da UF pelo cardanol em até 10% para o MOE, 5% para o MOR e 31% para TP. No teste de combustibilidade, verificou-se uma boa resistência à chama nos painéis com maiores acréscimos de cardanol. Logo, os resultados obtidos demonstram que é possível uma substituição em até 5% da UF pelo cardanol, atendendo assim todas as normas estabelecidas para a comercialização dos painéis.

**Palavras-chave:** Adesivos. Compósitos. Emissão de formaldeído.

## ABSTRACT

This study aimed to evaluate the quality of particleboard panels produced on a laboratory scale using cardanol instead of the urea-formaldehyde (UF) adhesive. Different percentages of cardanol were used, totaling five treatments of 0, 20, 40, 60 and 80% cardanol. The panels were produced with particles of *Pinus oocarpa* and a nominal density of 0.75 g/cm<sup>3</sup>. The mattress formed was pre-pressed in the manual press at room temperature, with a pressure of 2 MPa and then hot pressed, with a temperature of 160 °C, pressure of 4 MPa, in fifteen minutes. For adhesives, physical and chemical properties were evaluated. And for the panels, the physical and mechanical properties, the wood-adhesive interface (SEM) evaluation and the combustibility test were evaluated. Through the results obtained, it was observed that the substitution of cardanol for UF, caused an improvement in the humidity of the panels. As for water absorption (AA), thickness swelling (IE) and thickness non-return rate (TNRE), the mean values increased with the replacement of UF by cardanol, since cardanol may have hindered the adhesion of the particles on the panels. The results indicate that it is possible to substitute up to 47% of cardanol for IE. For mechanical properties, according to the CS 236-66 (1968) standard, a substitution of UF by cardanol in up to 10% for MOE, 5% for MOR and 31% for TP is acceptable. In the combustibility test, there was a good resistance to flame in the panels with higher cardanol additions. Therefore, the results obtained demonstrate that a replacement of up to 5% of UF by cardanol, meets all the rules established for the commercialization of panels.

**Keywords:** Adhesives. Composites. Formaldehyde emission.

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e a urbanização, as grandes cidades estão produzindo maiores quantidades de resíduos urbanos (LI et al., 2020) fato que preocupa a preservação do meio ambiente para gerações futuras. Uma alternativa para melhor utilização da madeira e preservação do meio ambiente são os painéis de madeira reconstituída (KHOSRAVI et al., 2010; JANG; HUANG; LI, 2011) uma vez que, o cuidado com o meio ambiente agrega valor à produção industrial, tornando-a mais competitiva (STOFFEL et al., 2014).

O Brasil, por exemplo, é destaque mundial na fabricação de painéis de madeira reconstituída, devido a grande área de reflorestamento de árvores dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, que apresentam elevada taxa de crescimento (IBA, 2017; SOTSEK; SANTOS, 2018). Entre esses painéis, os aglomerados surgiram como alternativa para o melhor aproveitamento de matérias-primas, visto que incorporam os princípios de gestão ambiental (TERZI et al., 2018). Esses painéis são amplamente utilizados na construção civil, nos setores de móveis e para decoração de interiores (OWODUNNI et al., 2020). Conforme a Food and Agricultural Organization (2018) a produção de aglomerado cresceu de 186 milhões de m<sup>3</sup>, em 2000, para 420 milhões de m<sup>3</sup>, em 2017.

A produção de painéis aglomerados torna-se interessante pela possibilidade de benefícios sociais, econômicos e empresariais (SORATTO et al., 2013). Esses painéis são produzidos com partículas de madeira ou resíduos, misturado com adesivo e levados à prensa quente (SUWAN et al., 2020). Sendo a ureia-formaldeído o adesivo mais utilizado (PAPADOPOULOU et al., 2016) devido ao seu baixo custo em comparação aos demais adesivos e alta reatividade (LIU et al., 2018). Porém, existem dois problemas associados a esse adesivo. Primeiro, o adesivo UF são derivadas de recursos petroquímicos não renováveis e a segunda questão é o formaldeído existente, altamente cancerígeno liberado em sua produção e ao longo do uso desses painéis (PRASITTISOPIN; LI, 2010).

Deste modo, o formaldeído tem sido o maior motivo de preocupação como poluente do ar interno, pois existe uma ampla gama de produtos à exposição humana que pode resultar em efeitos adversos à saúde. As exposições agudas e crônicas por inalação ao formaldeído em humanos, principalmente crianças, podem resultar em sintomas respiratórios, irritações nos olhos, nariz e garganta (MCGWIN JR.; LIENERT; KENNEDY JR., 2010).

Como resultado, muitos pesquisadores tentaram reduzir a quantidade de formaldeído adicionado nos adesivos, incluindo agentes de captura (LIU et al., 2018) ou utilizando apenas materiais de origem natural (PIZZI, 2016). Portanto, materiais de baixo custo, sustentáveis e inofensivos passaram a ser amplamente procurado nas indústrias de adesivos (CARVALHO; LELIS; NASCIMENTO, 2014).

Diante as variedades de materiais de origem naturais, o cardanol é uma fonte renovável aromática promissora, no qual representa uma alternativa natural aos fenóis derivados do petróleo (CAILLOL, 2018), sendo considerado um dos exemplos mais interessantes de matéria-prima sustentável. O cardanol é um subproduto obtido do líquido da casca de castanha de caju (LCC), cujo sua composição final depende do seu método de extração (FONTANA et al., 2019).

Esse material apresenta, portanto, peculiaridades em suas características químicas e físico-químicas, pois sua posição de dupla ligação permite inúmeras funcionalizações, além das usuais do anel fenólico e características específicas a seus derivados (antioxidante, resistência à chama e hidrofobicidade). Não possui cheiro agressivo, apresenta baixa volatilização e ponto de ebulição mais alto que os demais compostos fenólicos derivados do petróleo, favorecendo assim a saúde de quem o manuseia e a do meio ambiente (MAZZETTO; LOMONACO; MELE, 2009).

Uma das principais características do cardanol como matéria-prima renovável e intermediária química é sua não toxicidade (MAZZETTO; LOMONACO; MELE, 2009). Assim, o cardanol possui um grande potencial natural para a síntese de adesivos e polímeros resistentes à água. Esse composto exibe uma reatividade semelhante ao fenol, se tornando um possível substituinte renovável promissor para adesivos de painéis de madeira (PUCHOT, 2016).

A partir do estudo realizado por Pizzi (2006), foi observado que o adesivo à base de cardanol modificado pelo sistema de ozonólise para produção de painéis aglomerados, apresentou potencial, mas para ser considerado viável era necessário avaliar o custo do sistema ozonólise e o tempo de prensagem. Outros estudos realizados por Shukla, Srivastava e Srivastava (2015), Hu et al. (2019) e Vinod e Anandajothi (2020) relataram o potencial da síntese de adesivos à base de cardanol para diferentes tipos compósitos.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade de painéis aglomerados produzidos em escala laboratorial utilizando o cardanol em substituição ao adesivo ureia-formaldeído.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Obtenção e preparo do material lignocelulósico

Para a produção dos painéis aglomerados, foi utilizada a madeira de *Pinus oocarpa*, com aproximadamente 18 anos de idade, coletada no campus universitário da Universidade Federal de Lavras – UFLA. A plantação experimental está localizada no Município de Lavras na região sul de Minas Gerais, sob as coordenadas 21° 14' 45" S 44° 59' 59" W e altitude de 920 m.

Foram abatidas três árvores com auxílio de um motosserra, no qual foram retirados cinco discos de cada árvore nas alturas correspondentes a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, para a caracterização química e densidade básica. As árvores foram então seccionadas em toretes com 58 cm. Os discos foram encaminhados à Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM) da UFLA e seccionadas em quatro partes, com o auxílio de uma serra fita, obtendo duas cunhas opostas para análise química e outras duas utilizadas para confecção dos corpos de provas com dimensões 2,5 x 2,5 x 1,5 cm para a densidade básica.

Os toretes foram transportados para UEPAM onde foram imersos em um tanque com água por um período de 48 horas a 85 °C, com o objetivo de evitar o ataque de organismos xilófagos e fungos, e favorecer o amolecimento da madeira para o processo de laminação. As lâminas foram geradas em torno laminador, com espessura nominal de 2 mm e guilhotinadas nas dimensões de 480 x 480 mm. Em seguida foram secas naturalmente e em estufa, até atingirem o teor de umidade de 8%. As lâminas foram então moídas em moinho do tipo martelo, obtendo-se assim partículas. Essas partículas foram classificadas em peneiras sobrepostas de malha 12 (1,68 mm) e malha 20 (0,84 mm) com o objetivo de descartar partículas grosseiras e uniformizar o tamanho das partículas.

### 2.2 Caracterização física e química do material lignocelulósico

A densidade básica da madeira de *Pinus oocarpa* foi feita a partir dos corpos de provas obtidas das cunhas opostas, conforme o método de imersão em água, descrito pela norma técnica NBR 11941 (ABNT, 2003), sendo realizadas cinco repetições, e a umidade na base seca das partículas por meio da norma NBR 14929 (ABNT, 2017).

Para a análise das propriedades químicas do material lignocelulósico foram realizados testes em triplicatas. Determinando assim, os extrativos totais (ET) (NBR 14853) (ABNT, 2010), a lignina insolúvel (LI) (NBR 7989) (ABNT, 2010), teor de cinzas (CI) (NBR 13999) (ABNT, 2017) e a holocelulose que foi obtida pela adição dos níveis de lignina (LI), extrativos (ET) e cinzas (CI), subtraídos de 100, conforme mostrado na equação 1:

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - (\text{LI} + \text{ET} + \text{CI}) \quad (1)$$

### 2.3 Síntese e propriedades dos adesivos

Para a síntese dos adesivos, foram realizadas substituições da quantidade de cardanol por ureia-formaldeído (UF) comercial. O cardanol foi adicionado à UF de forma manual em diferentes concentrações conforme a Tabela 1, totalizando cinco tratamentos. Para a determinação dos respectivos valores, primeiramente, foi necessário à determinação da quantidade do teor de sólidos, ou seja, a quantidade de sólidos resinosos contido no adesivo UF e do cardanol.

Tabela 1 – Plano experimental.

<b>Tratamento</b>	<b>Substituição da UF por cardanol (%)</b>
T1	0
T2	20
T3	40
T4	60
T5	80

Fonte: Da autora (2021).

Os adesivos logo passaram por uma análise de propriedades físicas e químicas, pois essas propriedades afetam diretamente a colagem dos painéis. Tais como viscosidade, teor de substâncias sólidas e pH (ALMEIDA et al., 2010). A viscosidade foi obtida seguindo a norma da American Society for Testing and Materials ASTM D1200-10 (ASTM, 2018), o teor de sólidos ASTM D1582-60 (ASTM, 1994) e o pH por leitura de medição direta por meio do aparelho pHmetro Tecnal tec-3mp. Para todas as propriedades foi realizado três testes e os resultados foram suas respectivas médias.

## **2.4 Produção dos painéis aglomerados**

Para a produção dos painéis aglomerados convencionais, as partículas utilizadas foram as que passaram pela peneira de 12 mesh (1,68 mm) e ficaram retidas na peneira de 20 mesh (0,84 mm). Após serem classificadas, elas foram secas em estufa a 90 °C, até que atingissem uma umidade próxima de 5%.

Eles foram produzidos com densidade nominal de 0,75 g/cm<sup>3</sup> e dimensões de 25 x 25 x 1,5 cm (comprimento, largura e espessura, respectivamente). A aplicação do adesivo às partículas de cada painel foi realizada de forma separada e manual. Foram utilizadas diferentes porcentagens de adesivo conforme o item 2.3 para verificarmos a mais ideal, com um teor de 12% com base na massa seca das partículas, para todos os tratamentos.

A massa gerada, após a aplicação do adesivo e determinação em balança, foi levada para uma caixa de madeira formadora de colchão, com dimensões internas de 25 x 25 cm. O colchão formado foi então pré-prensado em prensa manual à temperatura ambiente a uma pressão de 2 MPa, para retirada de ar e pré-consolidação. Posteriormente, foram prensados a quente, com 160 °C de temperatura, pressão de 4 MPa, por tempo de 15 minutos. Para cada tratamento foram produzidos três painéis, totalizando 15 painéis.

Para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas os painéis foram acondicionados na sala de climatização a uma temperatura de 20 ± 2 °C e umidade do ar de 65 ± 3%. Em seguida, os painéis foram submetidos ao processo de esquadrejamento para a retirada dos efeitos de bordas e, posteriormente, na serra circular para a retirada dos corpos-de-prova.

## **2.5 Caracterizações dos painéis**

### **2.5.1 Avaliação interface madeira-adesivo**

Para a avaliação da interface madeira-adesivo foi realizado a análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Universidade Federal de Pernambuco, usando o microscópio do tipo FIB-SEM da TESCAN VEGA3 com tensão de 10 kV. Foram utilizados corpos-de-prova com dimensões de 1,0 x 1,0 x 1,5 cm (comprimento, largura e espessura, respectivamente), o qual foram analisados na região de fratura do ensaio de tração. Para isso, as amostras de cada

tratamento foram coladas em porta-amostras de alumínio (stubs) com fita dupla-face de carbono e cobertas com fina camada de ouro para serem observadas.

### 2.5.2 Propriedades físicas e mecânicas

Para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis, os testes foram realizados conforme as normas estabelecidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas.

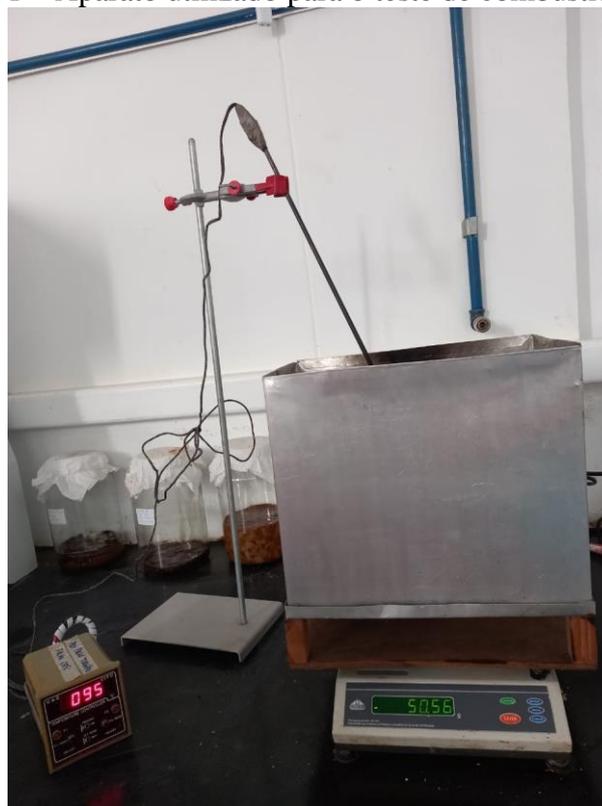
Testes	Metodologia
Absorção de água após 2h de imersão (AA 2h)	ASTM D1037 (ASTM, 2012)
Absorção de água após 24h de imersão (AA 24h)	ASTM D1037 (ASTM, 2012)
Inchamento em espessura após 2h de imersão (IE 2h)	ASTM D1037 (ASTM, 2012)
Inchamento em espessura após 24h de imersão (IE 24h)	ASTM D1037 (ASTM, 2012)
Taxa de não retorno em espessura (TNRE)	ASTM D1037 (ASTM, 2012)
Umidade	NBR 14810-2 (ABNT, 2018)
Densidade aparente	NBR 14810-2 (ABNT, 2018)
Tração perpendicular (TP)	NBR 14810-2 (ABNT, 2018)
Flexão estática – Módulo de elasticidade (MOE)	ANSI A208.1-09 (ANSI, 1993)
Flexão estática – Módulo de ruptura (MOR)	ANSI A208.1-09 (ANSI, 1993)

Fonte: Da autora (2021).

### 2.5.3 Teste de combustibilidade

Para avaliar o comportamento dos painéis durante a combustão, seguimos a metodologia proposta por Quirino (1991) e Setter et al. (2020). Foram utilizados corpos de prova de 5 x 5 cm, sendo os mesmos, posteriormente seccionados em quatro amostras por painel, de 2,5 x 2,5 cm cada, conforme Scatolino et al. (2015). O método consistiu em um dispositivo composto por um combustor fabricado em chapa de ferro galvanizada, uma base de alumínio e madeira, um controlador de temperatura, uma balança com precisão de 5 mg e um anteparo de alumínio que envolveu o combustor para protegê-lo da interferência do vento durante a combustão (FIGURA 1). Os dados de perda de massa e temperatura foram registrados a cada minuto durante o teste, onde os dados registrados foram processados para construir curvas de massa vs. tempo e temperatura vs. tempo.

Figura 1 – Aparato utilizado para o teste de combustibilidade.



Fonte: Da autora (2021).

## 2.6 Análise estatística dos dados experimentais

Adotou-se um delineamento inteiramente casualizado (DIC) para produção dos painéis aglomerados, com 5 tratamentos, sendo: T1 = 100% de adesivo UF; T2 = 80% adesivo UF + 20% cardanol; T3 = 60% adesivo UF + 40% cardanol; T4 = 40% adesivo UF + 60% cardanol; T5 = 20% adesivo UF + 80% cardanol. Adotou-se a densidade nominal de  $0,75\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  e espessura nominal de 15,70 mm. Foram produzidos 3 repetições por tratamento totalizando 15 unidades experimentais.

A análise estatística descritiva foi aplicada para avaliar a composição química com valores de média e desvio padrão. Para a caracterização dos adesivos e propriedades físicas e mecânicas dos painéis foram utilizadas análises de variância e de regressão, ambas a 5% de significância, com exceção da densidade aparente e razão de compactação, avaliadas por meio do teste Scott-Knott, ao nível de significância de 5%. A interface madeira adesivo foi avaliada por imagens digitais e o teste de combustibilidade foi verificado por meio de imagens gráficas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização física e química do material lignocelulósico

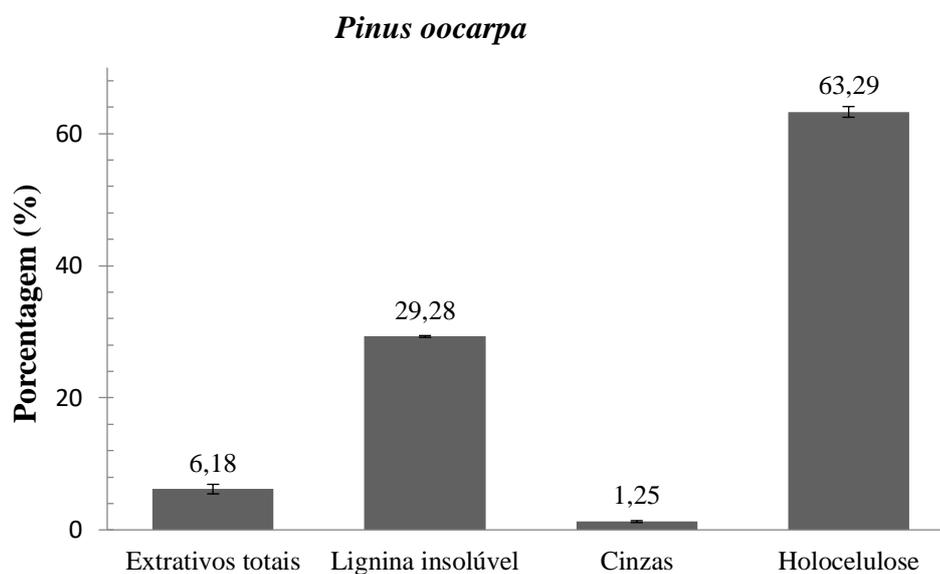
A baixa densidade é um dos requisitos fundamentais para utilizar materiais lignocelulósicos na produção de painéis aglomerados (SCATOLINO et al., 2017), pois a maior razão de compactação pode resultar na melhoria das propriedades mecânicas das chapas aglomeradas (BUFALINO et al., 2012), porém deve-se levar em consideração a composição química, estrutura anatômica da matéria-prima e o teor de adesivo utilizado. Além disso, o uso de madeiras de baixa densidade pode proporcionar maior porosidade do que as madeiras de alta densidade, o que facilita a impregnação e penetração do adesivo (MÜZEL, 2013).

O valor médio encontrado para a densidade básica do material lignocelulósico foi de  $0,48 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$ , próximo à encontrada por Andrade et al. (2019) que estudaram painel MDP produzido com *Pinus oocarpa* e encontraram uma média de  $0,456 \text{ g/cm}^3$ . A grande aceitação das espécies de pinus se dá, primordialmente, em função da sua baixa densidade, que pode resultar em painéis com alta razão de compactação (BALDIN et al., 2016). Para a umidade na base seca, foi encontrada uma média de 5,32%. O teor de umidade influencia diretamente na cura do adesivo no tempo de prensagem e na pressão necessária para consolidação do painel até a espessura final desejada (BARROS FILHO, 2009).

Conforme Nasser (2019) para produção dos painéis aglomerados, a etapa de secagem das partículas devem ser mantidas entre 3 e 12% de umidade, dependendo do tipo do adesivo a ser utilizado, a fim de garantir boa penetração. A Figura 2 apresenta os valores médios da caracterização química das partículas de *P. oocarpa*.

O valor médio encontrado para o teor de extrativos totais, mostrou-se inferior ao encontrado por Mendes et al. (2017) que analisaram a madeira de *P. oocarpa* e obtiverem uma média de 10,8%. O resultado obtido nesse trabalho mostra aceitável, pois altos teores de extrativos prejudica a qualidade dos painéis aglomerados (MACHADO et al., 2017) interferindo assim, nas reações de polimerização do adesivo (LIMA et al., 2007) ou seja, bloqueando o contato do adesivo com as partículas no processo de colagem (BUFALINO et al., 2012).

Figura 2 – Valores percentuais dos teores de extrativos totais, lignina insolúvel, cinzas e holocelulose para a madeira de *Pinus oocarpa*.



Fonte: Da autora (2021).

Para o valor de lignina insolúvel, Pinati et al. (2018), estudando a caracterização da madeira de *P. oocarpa*, obtiveram um valor médio inferior ao presente estudo de 26,08%. O valor superior é considerado ideal, pois a lignina contribui para os mecanismos de adesão, contribuindo para o processo de colagem das partículas (BUFALINO et al., 2012). Portanto, espera-se que painéis produzidos com maior teor de lignina apresentem maior resistência à água e melhores propriedades mecânicas (KHEDARI et al., 2004).

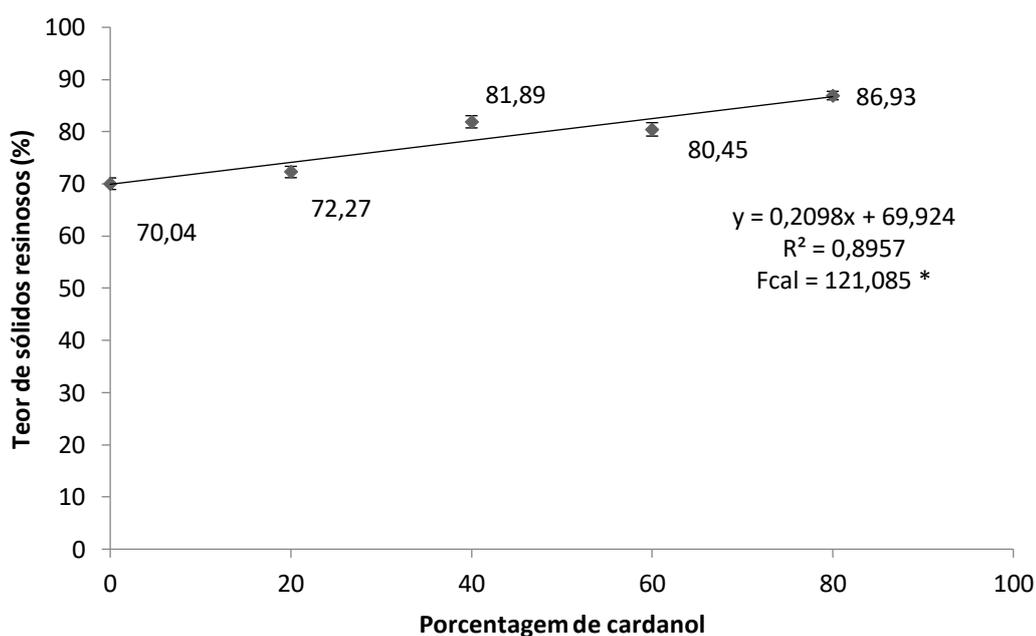
Em relação às cinzas, Andrade et al. (2019), estudando a madeira de *P. oocarpa*, encontraram um teor de 0,20%, mostrando-se inferior ao referente estudo. A presença de concentrações mais altas desse componente pode bloquear locais reativos para adesão com adesivos polares, afetando a qualidade da colagem e desempenho mecânico do painel (SOARES et al., 2017).

Para a holocelulose o valor encontrado no presente estudo mostra ideal e adequado quando comparado com os valores de holocelulose de *P. taeda* 70,43% (VIVIAN et al., 2015) e *P. oocarpa* 66,50% (MENDES et al., 2014). A holocelulose contém grupos hidroxila e características hidrofílicas que podem absorver a água (AYDIN, 2004; NOURBAKSH; BAGHLANI; ASHORI, 2011). Portanto, menores teores de holocelulose são desejáveis para a produção de painéis aglomerados (BUFALINO et al., 2012).

### 3.2 Propriedades dos adesivos

Na Figura 3 estão apresentados os valores médios percentuais dos teores de sólidos para os adesivos. Observa-se uma regressão linear significativa, para cada 1% de cardanol inserido houve um aumento da ordem de 0,21% para os teores de sólidos.

Figura 3 – Análise de regressão linear do teor de sólidos resinoso dos adesivos em função da porcentagem de cardanol na composição dos painéis.



Fonte: Da autora (2021).

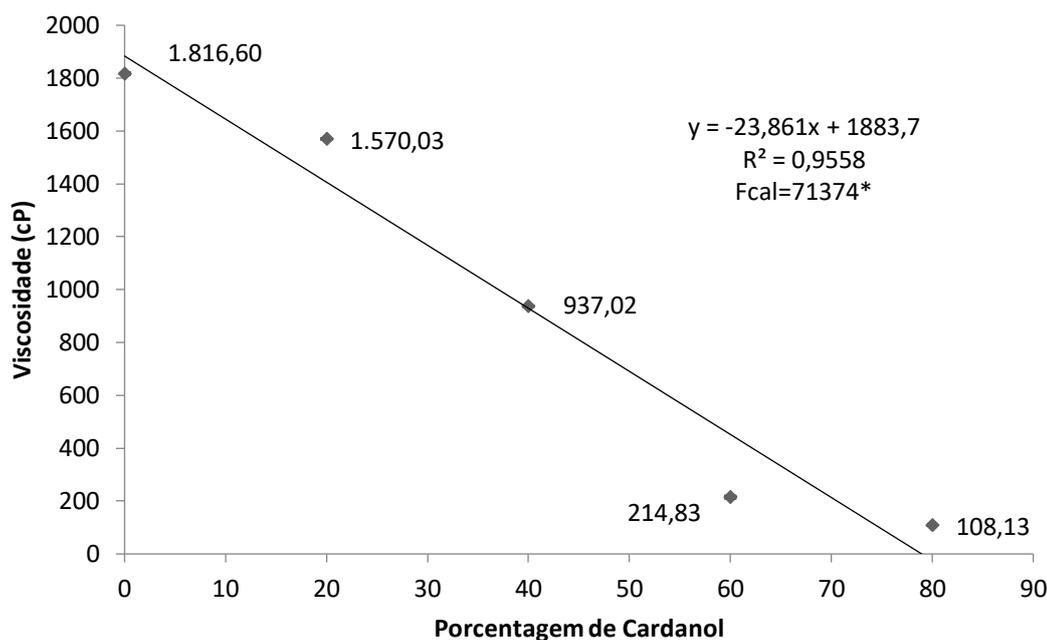
Um alto valor desta propriedade pode contribuir para a qualidade da linha de cola, melhorando a adesão entre a madeira e o adesivo. Porém, também é possível obter uma linha de cola mais espessa devido a maior quantidade de material sólido, o que pode piorar a adesão (BIANCHE, 2014).

Parameswaran, Abraham e Thachil (2010), em um estudo comparativo de adesivos à base de cardanol, encontraram um teor de sólidos de 78% para o adesivo fenol-cardanol-formaldeído e 81% para cardanol-formaldeído, valores próximos ao presente estudo. Já Sozim et al. (2019) obtiveram um teor de sólidos de 68% para o adesivo UF, valor próximo ao adesivo UF sem acréscimo de cardanol. No entanto, acredita-se que um alto teor de sólidos nos adesivos para os painéis aglomerado seja satisfatório (AVERINA et al., 2021) visto que, esse teor indica a porcentagem de sítios reativos com o agente ligante, e um

maior teor de sólidos no adesivo torna mais resistente a linha de cola (CARVALHO; LELIS; NASCIMENTO, 2014).

Os valores médios obtidos para a viscosidade estão apresentados na Figura 4. Verifica-se uma correlação significativa e negativa, ou seja, houve uma redução para cada 1% de inserção de cardanol em 23,86% para a viscosidade.

Figura 4 – Análise de regressão linear da viscosidade (cP) dos adesivos em função da porcentagem de cardanol na composição dos painéis.



Fonte: Da autora (2021).

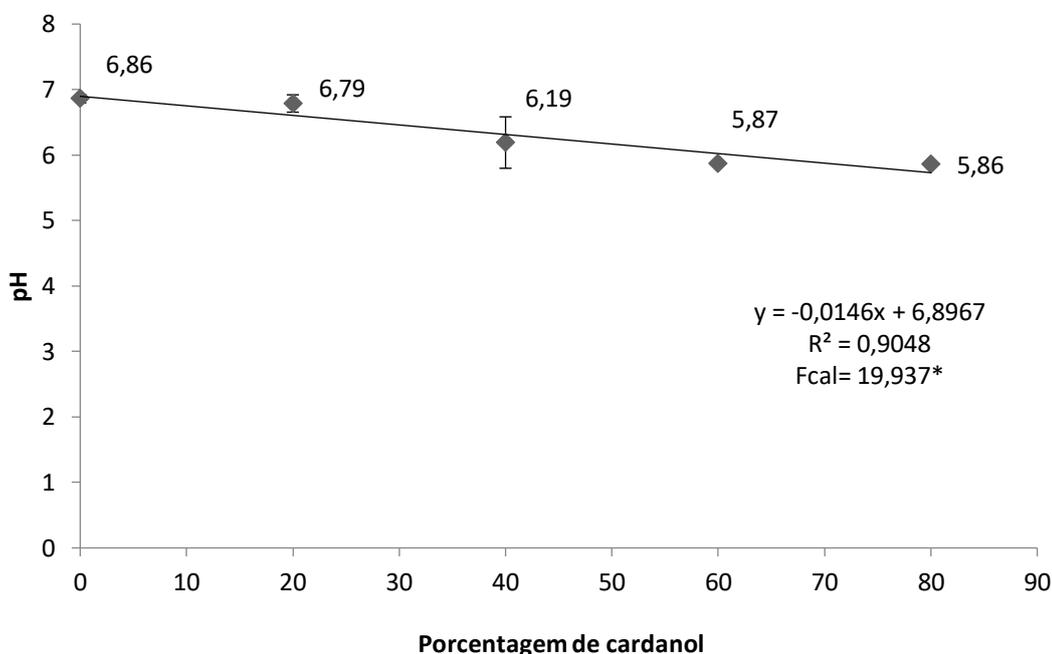
A viscosidade do adesivo é um fator importante, pois afeta a resistência do painel e a união do adesivo com a madeira (HONG; PARK, 2017). Observa-se que as viscosidades dos adesivos diminuíram à medida que adicionou cardanol. Esse fenômeno pode ser explicado pela longa cadeia de alquilenos existente no cardanol, sendo responsável pela baixa viscosidade (MONISHA et al., 2019).

Uma baixa viscosidade facilita a aplicação ou a pulverização do adesivo (CARVALHO; LELIS; NASCIMENTO, 2014) resultando em um melhor espalhamento, maior penetração do adesivo e sua absorção pela madeira (BIANCHE et al., 2017). Enquanto um alto valor afeta negativamente a fluidez do adesivo, as propriedades de espalhamento, a molhabilidade e a penetração durante a produção dos compósitos à base de madeira (MI et al., 2021).

Sangeetha (2018), estudando adesivos à base de cardanol obtiveram um teor de viscosidade 159 Cp para o cardanol puro e 269 cP para o cardanol-formaldeído, valores próximos a uma porcentagem de 55 a 80% de cardanol em substituição com ureia-formaldeído. Já Sozim et al. (2019) encontraram para o adesivo tanino-formaldeído um teor de 100-200 cP, valores próximos a 60% e 80% de cardanol em associação com a UF.

Para a Figura 5 encontra-se os valores correspondente ao pH dos adesivos. Nota-se uma relação linear significativa e negativa, para cada 1% de cardanol inserido houve uma redução de ordem em 0,01% ao pH.

Figura 5 – Análise de regressão linear do pH dos adesivos em função da porcentagem de cardanol na composição dos painéis.



Fonte: Da autora (2021).

O conhecimento do pH nos adesivos é de fundamental importância, pois reflete diretamente na qualidade da linha de cola (SEGUNDINHO et al., 2017). Conforme Iwakiri (2005), os valores do pH dos adesivos devem estar compreendidos numa faixa de variação estipulada entre 2,5 e 11. O fato do pH estar fora desta faixa pode resultar numa degradação das fibras da madeira, e se o pH for muito baixo pode proporcionar a formação de espuma na mistura, prejudicando o processo de colagem.

Ghari e Pizzi (2018), em busca da redução de emissão de formaldeído em painéis aglomerados, encontraram um pH de 5,5 para a UF em associação com tanino de castanha. Conforme os autores, o adesivo UF é catalisado por meio ácido, logo requer uma condição

ácida para curar. O pH encontrado nos adesivos no presente estudo são classificados em ambos os casos como ácido, mostrando próximo ao estudo de Ghari e Pizzi. Já Atta et al. (2017), estudando o adesivo cardanol-epóxi, obtiveram um pH médio de 4,8 valor que pode ser considerado baixo, evidenciando a mesma tendência do presente estudo com o acréscimo do cardanol.

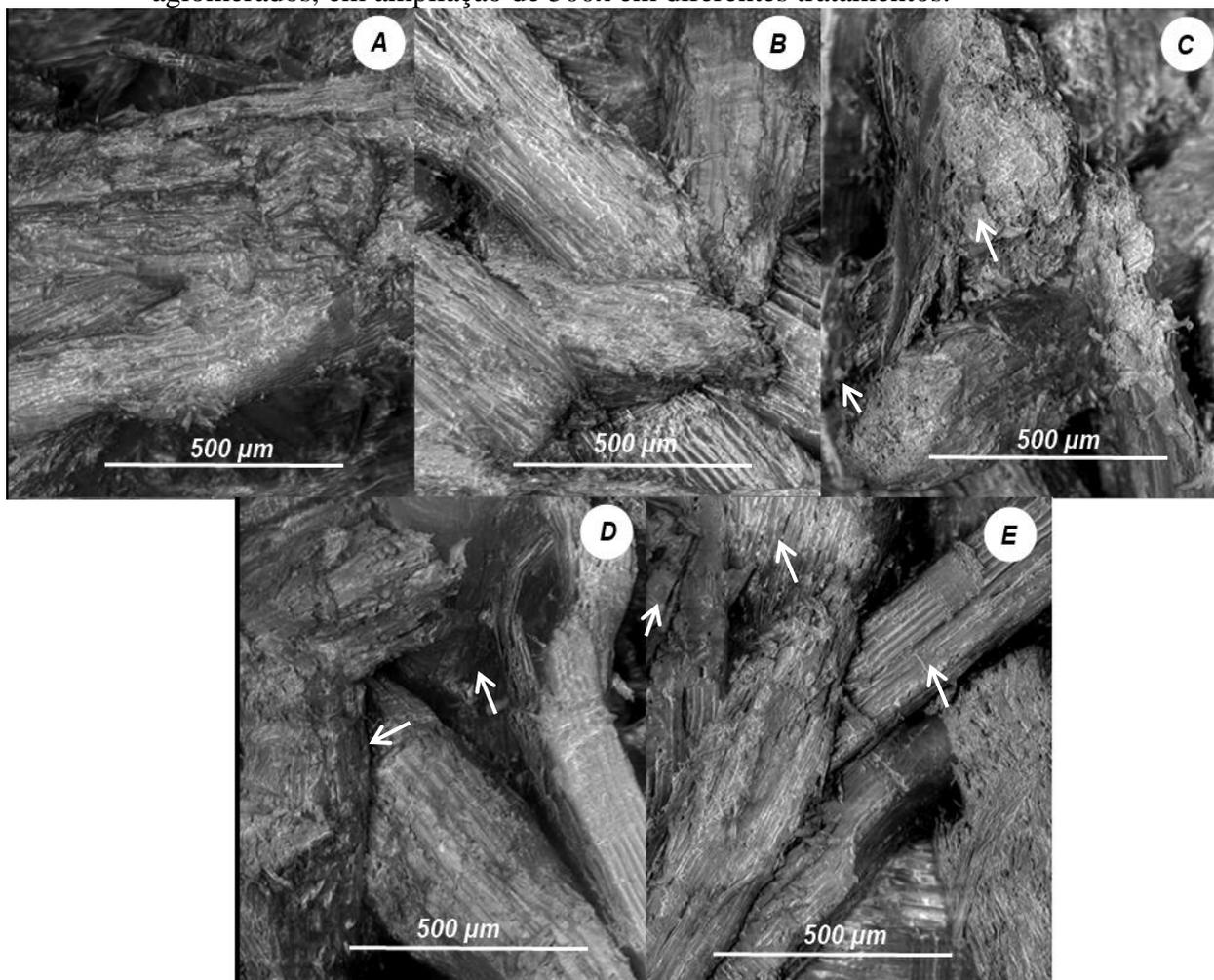
Conforme Sperling (1957 apud DEVI; SRIVASTAVA, 2007), a diminuição do pH nos adesivos com o acréscimo do cardanol ao formaldeído, pode ser atribuída à formação de ligações de hidrogênio entre os grupos *orto*-metilol e hidroxila que liberaram íons de hidrogênio, levando assim um aumento da acidez na mistura da reação, fato que pode ser explicado para o aumento da acidez nos adesivos, observado no presente estudo.

### **3.3 Caracterizações dos painéis**

#### **3.3.1 Avaliação interface madeira-adesivo (MEV)**

A Figura 6 mostra micrografias obtidas em microscópio eletrônico de varredura para os painéis dos cinco tratamentos. Observa-se na Figura 6a que o tratamento T1 possui um arranjo de partículas mais organizado e compacto que os demais tratamentos. Os tratamentos que tiveram acréscimo de cardanol possuem pontos brancos em maiores quantidade que o tratamento T1, logo supõe-se que esses pontos brancos sejam o adesivo que não penetrou nas partículas, o que pode resultar em uma diminuição de adesão nos painéis e conseqüentemente o surgimento de maiores espaços vazios entre as partículas e sob elas (conforme indicado na micrografia), influenciando assim as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Figura 6 – Micrografias eletrônicas de varredura exibindo a fratura na tração dos painéis aglomerados, em ampliação de 500x em diferentes tratamentos.



Legenda: (A) T1; (B) T2; (C) T3; (D) T4; e (E) T5.  
 Fonte: Da autora (2021).

### 3.3.2 Propriedades físicas

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios encontrados para densidade aparente e razão de compactação. Observa-se que os valores obtidos para a densidade aparente dos painéis não diferiram estatisticamente, indicando que a inserção do cardanol não afetou essa propriedade. De acordo com a norma Commercial Standard CS 236-66 (CS, 1968), os painéis são classificados de média densidade, pois os valores estão entre 0,60 e 0,80 g/cm<sup>3</sup>.

Os valores obtidos foram condizentes com os reportados na literatura. Oliveira et al. (2017), avaliaram diferentes tipos de painéis aglomerados industriais produzidos com madeira de *Pinus*, eucalipto e bagaço, encontraram uma densidade média de 0,62 g/cm<sup>3</sup>,

valores próximos ao presente estudo. Lourenço Neto et al. (2014) obtiveram para o painel aglomerado com madeira de *Pinus* e adesivo UF, um valor médio de  $0,68 \text{ g/cm}^3$  classificado como de média densidade, do mesmo modo que os tratamentos do presente estudo, percebe-se, portanto, que o cardanol não afetou os valores de densidade, revelando um bom potencial.

Tabela 3 – Densidade aparente e razão de compactação dos tratamentos em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol.

<b>Tratamento</b>	<b>Densidade aparente (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b>	<b>Razão de compactação (%)</b>
<b>T1</b>	$0,62 \pm 0,04 \text{ A}$	$1,29 \pm 0,08 \text{ A}$
<b>T2</b>	$0,65 \pm 0,05 \text{ A}$	$1,35 \pm 0,11 \text{ A}$
<b>T3</b>	$0,60 \pm 0,05 \text{ A}$	$1,25 \pm 0,11 \text{ A}$
<b>T4</b>	$0,61 \pm 0,08 \text{ A}$	$1,28 \pm 0,17 \text{ A}$
<b>T5</b>	$0,62 \pm 0,06 \text{ A}$	$1,29 \pm 0,13 \text{ A}$

\* Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, ao nível de significância de 5%.

Fonte: Da autora (2021).

Embora a densidade encontrada tenha sido menor que a nominal de  $0,75 \text{ g/cm}^3$ , os valores encontrados não prejudicaram a interpretação dos resultados. Conforme Andrade et al. (2018), um dos fatores que pode influenciar nos valores da densidade aparente é à especificidade das condições laboratoriais em relação ao processo industrial, ocasionando perdas de materiais durante o manuseio das partículas nas etapas de aplicação de adesivo, formação do colchão e prensagem dos painéis.

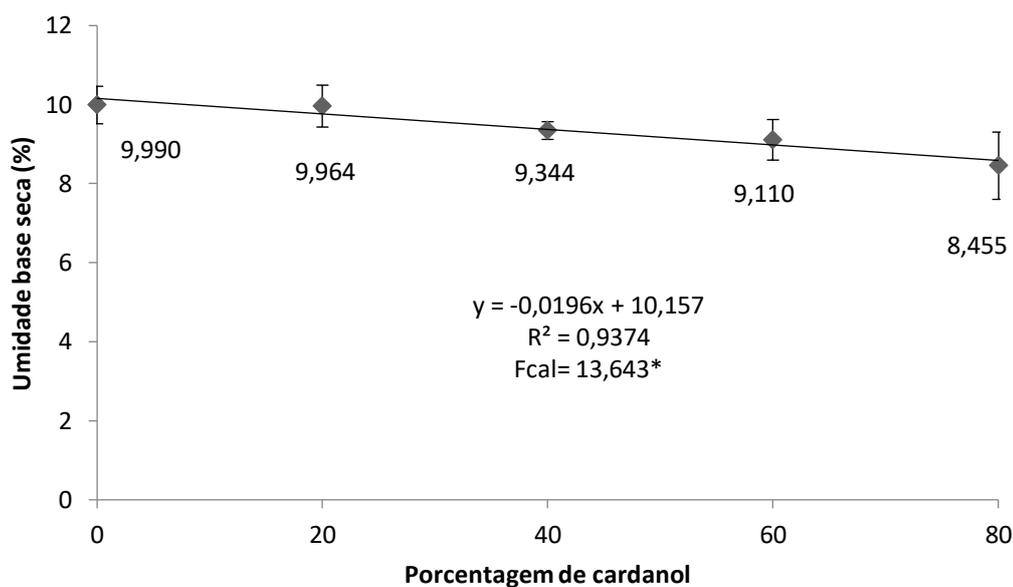
Para a razão de compactação, os painéis não apresentaram diferenças estatísticas à medida que os teores de cardanol foram acrescentados em proporções crescentes na composição dos painéis, seguindo o mesmo comportamento da densidade aparente. De acordo com Maloney (1993) e Moslemi (1974), para que ocorra um contato adequado entre as partículas de madeira e a formação da ligação adesiva, os painéis aglomerados devem ter uma razão de compactação, na faixa de 1,3 a 1,6 logo todos os painéis mostram-se adequados.

Os valores encontrados estão na faixa dos valores descritos na literatura. Trianoski et al. (2016) estudaram painéis de partículas de *Grevillea robusta* e *Pinus*, encoladas com adesivo UF e obtiveram valor médio de 1,36. Do mesmo modo, ao estudo de Sozim et al. (2019), que obtiveram uma média de 1,34 para painéis aglomerados com a madeira *Pinus* e

*Ligustrum*, e o adesivo UF, já aos tratamentos com o adesivo tanino-formaldeído, os autores obtiveram um valor de 1,18, inferior ao presente estudo.

Para a umidade na base seca os valores se encontram na Figura 7. Verifica-se uma relação linear significativa e negativa, para cada 1% de cardanol inserido ocorre uma redução de 0,02% na umidade base seca.

Figura 7 – Umidade na base seca dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol.



Fonte: Da autora (2021).

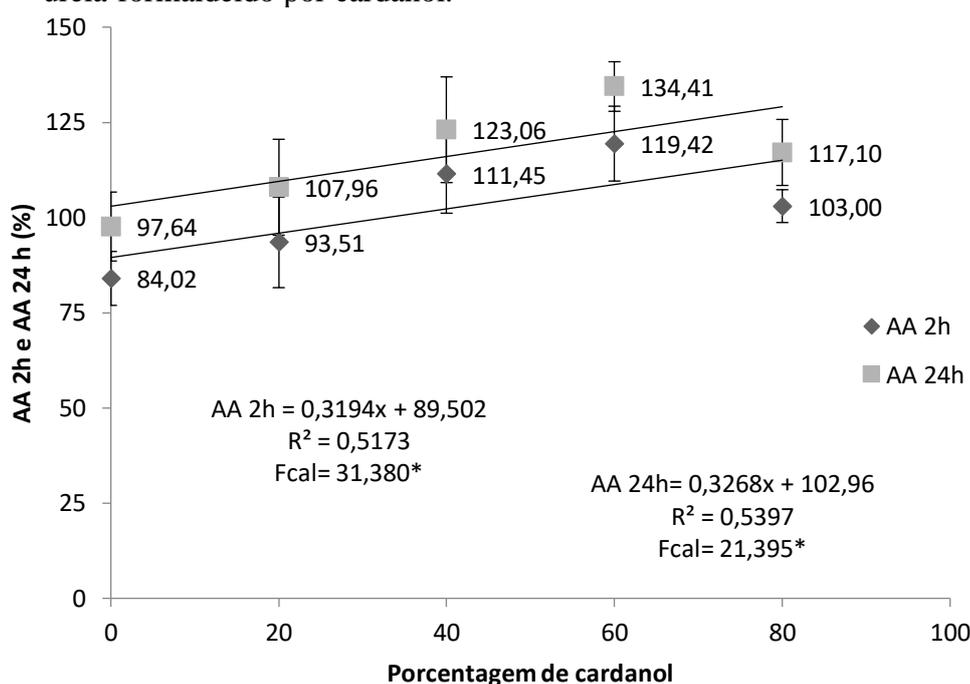
Acredita-se que a maior porcentagem do cardanol em associação com a UF pode ter provocado uma impermeabilização aos painéis, reduzindo dessa forma a susceptibilidade à absorção de umidade (FRANÇA et al., 2016), uma vez que o cardanol possui características hidrofóbicas (LI et al., 2021). No entanto, como os painéis estavam em uma temperatura ambiente acredita-se que o cardanol serviu como uma barreira à absorção de umidade.

Comparando os valores médios obtidos, nota-se que os painéis atendem as especificações da NBR 14810 (ABNT, 2018), que estipula valores entre 5% a 11%. Do mesmo modo para a ANSI A208.1 (ANSI, 2009), que determina valores no máximo 10%. Cunha et al. (2014), estudando painéis aglomerados com partículas de *Sequoia sempervirens*, *P. taeda* e *P. elliotii*, encolados com adesivo UF obtiveram valor médio de 9,66%, valor próximo ao presente estudo. Do mesmo modo, Mendes et al. (2018), ao

estudar painéis aglomerados com a madeira de *P. oocarpa* e o adesivo UF, encontraram uma média de 9,72%.

Na Figura 8 estão os valores médios de absorção de água após 2 e 24 horas de imersão. Observa-se que para cada 1% de cardanol inserido, houve um aumento de 0,32% para AA 2 h e 0,33% para AA 24 h.

Figura 8 – Absorção de água após 2 e 24 horas dos painéis em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol.



Fonte: Da autora (2021).

Os valores do presente estudo mostraram-se próximos aos obtidos por Pereira et al. (2017), que estudaram painéis aglomerados com a madeira de *Pinus* spp., com teor de 12% de adesivo UF e obtiveram para absorção após 2 e 24 horas, 94,9 % e 104%, respectivamente.

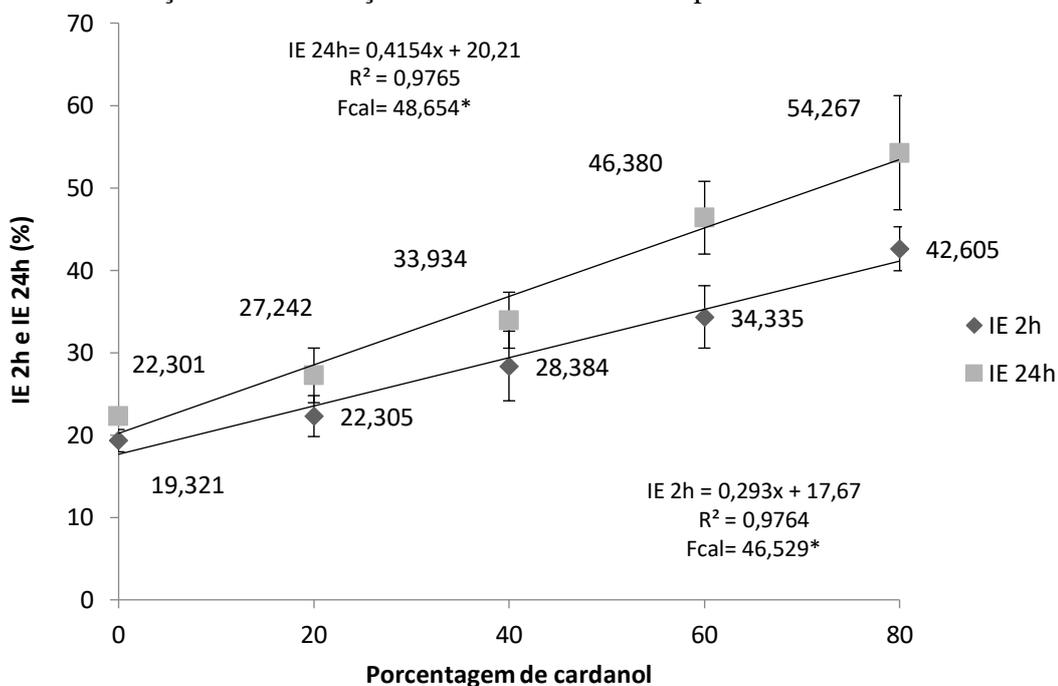
Apesar de o cardanol possuir propriedades hidrofóbicas, foi verificado nas micrografias que os adesivos com acréscimo de cardanol ocasionou uma diminuição da adesão e o surgimento de espaços vazios, ocorrendo, portanto, uma maior absorção de água nos painéis. Conforme Baldin et al. (2016), uma baixa adesão contribui para o aumento dos espaços vazios nos painéis e conseqüentemente facilita a absorção de água, uma vez que, este processo ocorre por capilaridade.

De acordo com Mendes et al. (2012), para que aconteça uma diminuição na absorção de água nos painéis, deve ocorrer um aumento nos teores de adesivo,

ocasionando, portanto, um maior recobrimento das partículas e proporcionando uma melhor ligação delas, tendo por consequência a diminuição dos valores médios desta propriedade. Considera-se, portanto, que a diminuição do adesivo sintético e o acréscimo do cardanol dificultaram a adesão das partículas nos painéis, conforme observado nas micrografias.

Os valores médios obtidos para as propriedades de inchamento em espessura, após 2 h (IE 2 h) e 24 h (IE 24 h) de imersão em água, estão apresentados nas Figura 9. Pode-se observar que a relação entre o inchamento em espessura e o aumento da porcentagem de cardanol mostrou uma regressão linear significativa. Para cada 1% de cardanol inserido, houve um aumento da ordem de 0,29% para IE 2 h e 0,42% para IE 24 h.

Figura 9 – Inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol.



Fonte: Da autora (2021).

Silva et al. (2017), estudando a viabilidade de utilização de lignosulfonatos (lignina sulfonada) como adesivo natural e o efeito da substituição do adesivo fenol-formaldeído nos painéis aglomerados com densidade nominal de  $0,70\text{ g/cm}^3$ , produzidos com a madeira de *P. caribaea*, identificaram a mesma tendência que o cardanol, ou seja, com a maior a proporção de lignosulfonato, ocorreu maior o inchamento em espessura após 2 e 24 h. Os valores médios encontrados por Silva em uma substituição de até 80% de lignina sulfonada por FF, foram inferiores ao presente estudo, sendo de 15,21 e 24,9% para a IE 2 e 24 h

respectivamente, uma vez que o adesivo fenol-formaldeído apresenta alta resistência à umidade, sendo indicada para produtos de exteriores (SILVA, 2018).

Já Machado et al. (2017), estudando painéis aglomerados fabricados com resíduos de coco babaçu e o adesivo poliuretano bicomponente à base de óleo de mamona com um teor de 12% em relação ao peso seco das partículas, obtiveram uma média de 21,31% para o IE 2 h, valor inferior ao presente estudo e de 57,32% para IE 24 h mostrando superior. Uma alternativa para diminuir a absorção de moléculas de água, seria o aumento da aplicação de concentrações de adesivos ou parafinas como impermeabilizantes (FIORELLI et al., 2011) e, conseqüentemente, os valores de inchamento em espessura e absorção de água dos painéis também diminuiriam, pelo fato de bloquearem parcialmente os sítios de adsorção (MACHADO et al., 2017).

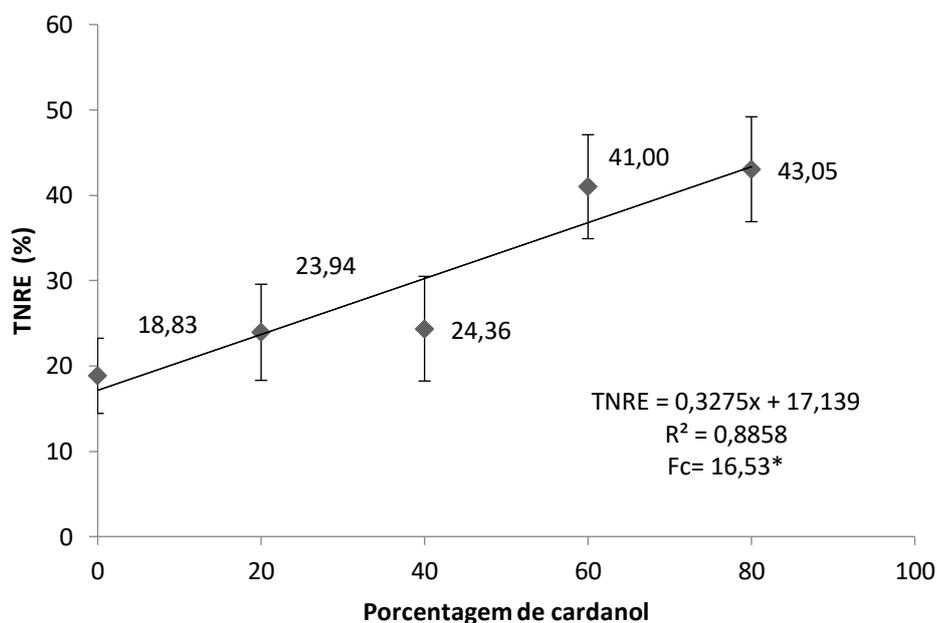
De acordo com a norma CS 236-66 (CS, 1968), para IE 24 h os valores máximos devem ser de 35% para painéis de média densidade, sendo assim os tratamentos com até 47% de cardanol atenderiam à norma. Quanto aos demais tratamentos com maiores porcentagens de cardanol, supõe-se que as partículas que constituem os painéis não estariam suficientemente aderidas para resistirem à imersão em água (BALDIN et al., 2016). A baixa qualidade de adesão destes tratamentos, conforme observado nas micrografias, proporcionou uma maior quantidade de espaços vazios, facilitando, portanto a translocação de água pelas paredes celulares.

Conforme França et al. (2016), este fato pode ter ocorrido devido à baixa porcentagem do adesivo ureia-formaldeído e o aumento do cardanol, proporcionando uma menor ligação do adesivo entre as partículas, e conseqüentemente um aumento nos espaços vazios, o que facilita a translocação de água, fato condizente ao reportado na literatura de Sozim et al. (2019).

Na Figura 10 estão descritos os valores da taxa de não retorno de espessura (TNRE), observa-se que o acréscimo do cardanol há um aumento linear da TNRE, sendo que a cada 1% de inserção de cardanol, ocorreu um aumento de ordem de 0,33%. Mendes et al. (2014), estudando a qualidade de painéis aglomerados homogêneos produzidos com a madeira de clones de *E. urophylla*, adesivo ureia-formaldeído no teor de 6% e densidade nominal de 0,60 g/cm<sup>3</sup>, obtiveram uma média de TNRE de 29,08%. Já para parâmetro de comparação, os painéis com a madeira de *P. oocarpa*, foi observado um valor médio de 25,1%. Os valores encontrados estão próximos aos tratamentos com acréscimo de 20% a 50% de cardanol.

Conforme o mesmo autor, a TNRE tem relação direta com a propriedade IE24 h pois quanto maior o IE em 24 h maior a TNRE, isso ocorre devido à maior variação em espessura resultante da liberação das tensões de compressão imposta pelo painel durante a prensagem, que o torna parcialmente irrecuperável. Brito (2018), avaliando a qualidade de painéis aglomerados (MDP), com densidade nominal de  $0,65 \text{ g/cm}^3$ , constituídos por partículas de bagaço de cana-de-açúcar, bambu e o adesivo UF em um teor de 10% em relação a massa seca das partículas, encontrou uma média de 35,18% uma média próxima à média geral do presente trabalho. Neste sentido, uma substituição em até 50% de cardanol a UF mostraram próximos aos encontrados na literatura.

Figura 10 – Taxa de não retorno de espessura dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol.



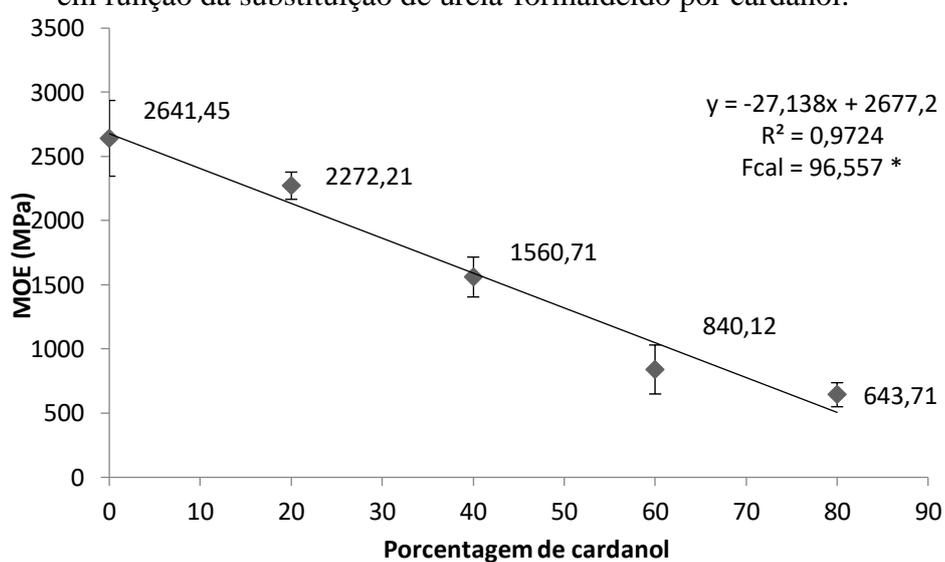
Fonte: Da autora (2021).

### 3.3.3 Propriedades mecânicas

Nas Figuras 11 e 12 verifica-se o comportamento do módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) nos painéis aglomerados. A regressão linear foi a que melhor representou a relação entre porcentagem de cardanol e os valores destas propriedades. Acontecendo assim uma correlação significativa e negativa, ou seja, houve uma redução para cada 1% de inserção de cardanol de 27,13 e 0,13 MPa para MOE e MOR, respectivamente.

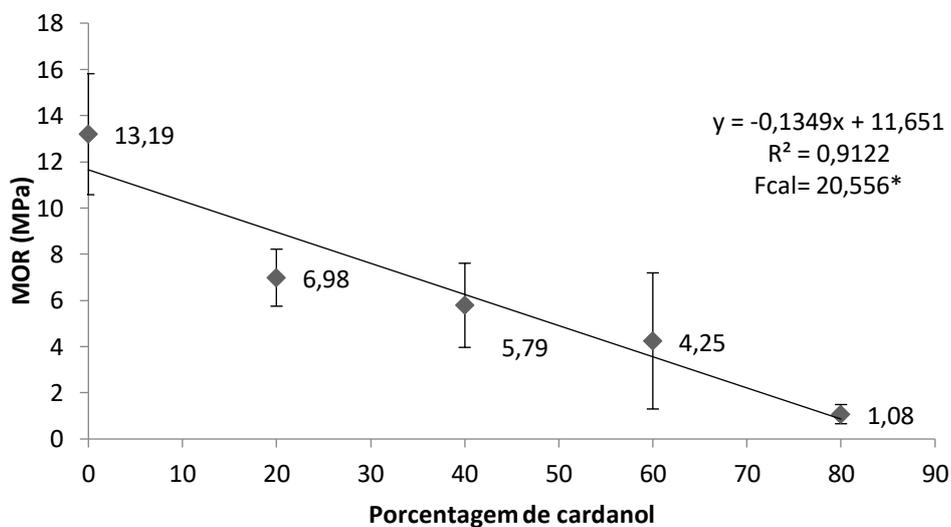
Conforme a literatura, Alamsyah et al. (2020) obtiveram uma mesma tendência de resultados apresentados nesta pesquisa para as propriedades de MOE e MOR. Os autores confeccionaram painéis aglomerados com densidade nominal de  $0,70 \text{ g/cm}^3$ , madeira de sengon (*Paraserianthes moluccana*), ligados com adesivos à base de dextrina e adesivos de ureia formaldeído no teor de 15% em relação a massa seca das partículas, a uma prensagem de 4 MPa durante 30 min e relataram que à medida que acrescentavam dextrina ao adesivo levava à redução da resistência dos painéis.

Figura 11 – Comportamento do módulo de elasticidade (MOE) dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol.



Fonte: Da autora (2021).

Figura 12 – Comportamento do módulo de ruptura (MOR) dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol.



Fonte: Da autora (2021).

Vieira et al. (2020) produziram painéis aglomerados com densidade nominal de  $0,65\text{g/cm}^3$ , resíduos de cevada industrial e partículas de *Pinus* spp., adesivo UF com um teor de 12% em relação a massa seca das partículas e ciclo de prensagem de oito minutos, a  $160\text{ }^\circ\text{C}$  e pressão máxima de 4 MPa. Encontraram valores médios de 814,86 MPa para o MOE e 8,52 MPa para MOR. Em comparação ao presente estudo, pode-se observar que os valores de MOE foram inferiores e para o MOR superiores.

Trianoski et al. (2016), estudando a incorporação de *Grevillea robusta* na produção de painéis aglomerados de *Pinus*, com densidade nominal de  $0,70\text{ g/cm}^3$ , adesivo UF a um teor de 8% em relação a massa seca das partículas, com um ciclo de prensagem de oito minutos, temperatura de  $160\text{ }^\circ\text{C}$  e pressão específica de 4 MPa. Obtiveram um valor médio para o MOE de 1506,39 MPa, mostrando próximo a média geral do presente estudo, e para o MOR um valor médio de 11,09 MPa mostrando superior à média geral.

Nota-se na literatura que adesivos livres de formaldeído, ou com uma redução mínima do ligante de formaldeído afeta significativamente as propriedades mecânicas dos produtos finais (NAKANISHI et al., 2018). Conforme observado nas micrografias o acréscimo do cardanol, ocasionou a redução de adesão nas partículas, reduzindo assim a qualidade de colagem, o que pode ter proporcionado, portanto uma diminuição das propriedades mecânicas nos painéis (BALDIN et al., 2016).

Um estudo comparativo de adesivos fenólicos do tipo resol à base de cardanol, realizado por Parameswaran, Abraham e Thachil (2010), foi relatado que a incorporação acima de 6% molar de cardanol ao adesivo fenol-cardanol-formaldeído reduziu a resistência à tração do adesivo. Conforme os autores, essa diminuição deve ter ocorrido devido menor extensão de reticulação, devido à longa cadeia lateral do cardanol.

Para a compressão do adesivo a resistência diminui gradualmente com o aumento do teor de cardanol. O efeito plastificante do cardanol, e o menor nível de empacotamento devido os grupos laterais, podem ter causado a redução da resistência à compressão do adesivo. E para a resistência a flexão um teor de 4-6% molar de cardanol não interferiu a resistência, já teores mais altos diminuiu a resistência ao impacto, devido à flexibilidade conferida pelas longas cadeias de hidrocarbonetos nas unidades de cardanol.

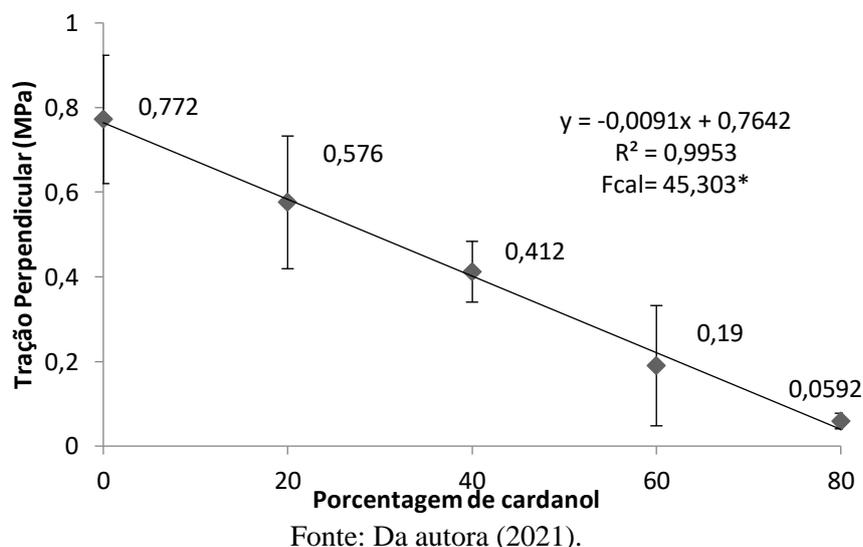
Contudo, a resistência do adesivo é definida mecanicamente como a tensão necessária para separar os substratos que estão colados, ou seja, influencia diretamente as ligações químicas primárias e secundárias da cadeia do polímero do adesivo, da madeira e da interface madeira-adesivo (FRIHART, 2005). Acredita-se, portanto, que a resistência do

adesivo diminuiu com o aumento do cardanol, influenciando assim as propriedades mecânicas dos painéis, uma vez que o cardanol possui baixa propriedade mecânica devido à sua alta fragilidade (DASHTIZADEH; ABDAN; JAWAID, 2020). Além disso, ressalta-se que os espaços vazios observados nas micrografias, com menor área de contato entre partícula e adesivo, deixaram os painéis mais heterogêneos e por isso, mais susceptíveis em relação à distribuição das solicitações, ou seja, esforços no painel.

A norma CS 236-66 (CS, 1968), exige um valor mínimo de 2402,63 MPa para MOE e 10,98 MPa para o MOR. Observa-se que até 10% de cardanol atende os requisitos da norma para o MOE e até 5% para o MOR.

O modelo de regressão ajustado em função do aumento da porcentagem de cardanol ao adesivo UF para os valores de tração perpendicular (TP) está representado na Figura 13. Observa-se que o aumento de 1% de cardanol, levou a um decréscimo de tração perpendicular na ordem de 0,0091 MPa.

Figura 13 – Tração perpendicular (TP) dos painéis aglomerados em função da substituição de ureia-formaldeído por cardanol.



Pereira et al. (2017) avaliou o potencial de utilização da madeira de *E. badjensis* com a madeira de *Pinus* spp. como alternativa para a produção de painéis de madeira aglomerada, utilizando 12% do adesivo ureia-formaldeído em relação a massa seca das partículas. Os autores obtiveram um valor de 0,58 MPa para o painel de *Eucalyptus* semelhante aos tratamentos de 20% de cardanol. Para o painel de *Pinus* spp., obtiveram uma média de 0,28 MPa inferior à média geral do presente estudo. E para a mistura das duas madeiras obtiveram uma média de 0,55 MPa mostrando próximos.

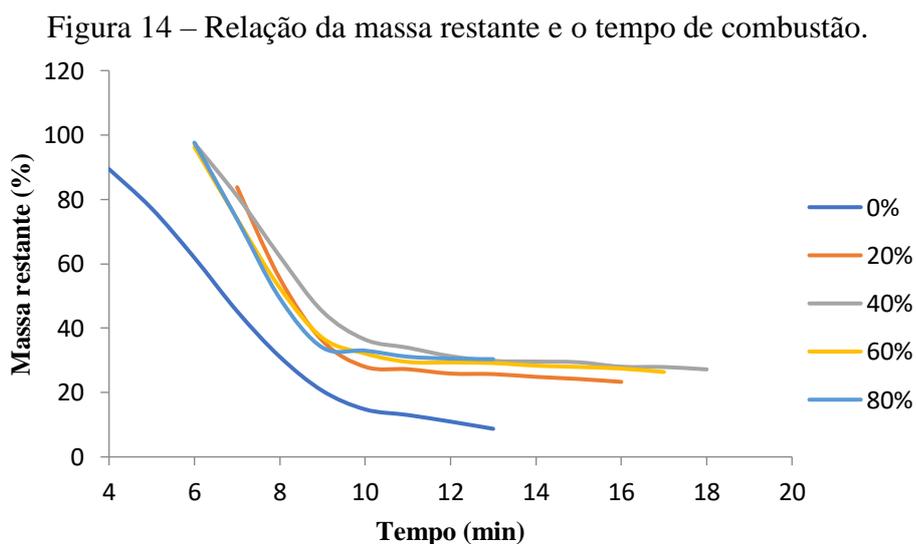
Souza et al. (2018), estudando painéis aglomerados com resíduos de madeira de *Pinus* sp., com a adesivo de tinta à base de epóxi juntamente a ureia, obtiveram um média de 0,15 MPa, e Nakanishi et al. (2018), estudando painéis aglomerados com adesivo natural látex com resíduos de bagaço de cana de açúcar, obtiveram um média de 0,11 MPa, em ambos os estudos valores inferiores ao presente estudo. Já Alamsyah et al. (2020), utilizando dextrina com o adesivo UF, obtiveram a mesma tendência do cardanol.

Segundo Baldin et al. (2016), os baixos valores encontrados para a tração perpendicular, indica quão significativa é à interação realizada entre as partículas e o adesivo utilizado, uma vez a tração perpendicular é diretamente relacionada as propriedades físico-mecânicas dos painéis.

Acredita-se, portanto que a tração perpendicular seguiu o mesmo padrão de comportamento encontrado nas propriedades físicas e mecânicas do presente estudo. A norma CS 236-66 (CS, 1968) exige um valor mínimo de 0,48 MPa, logo os painéis em até 31% de cardanol são capazes de atender esse requisito.

### 3.3.4 Combustibilidade

A Figura 14 mostra a variação da massa restante dos painéis aglomerados conforme o tempo de combustão.



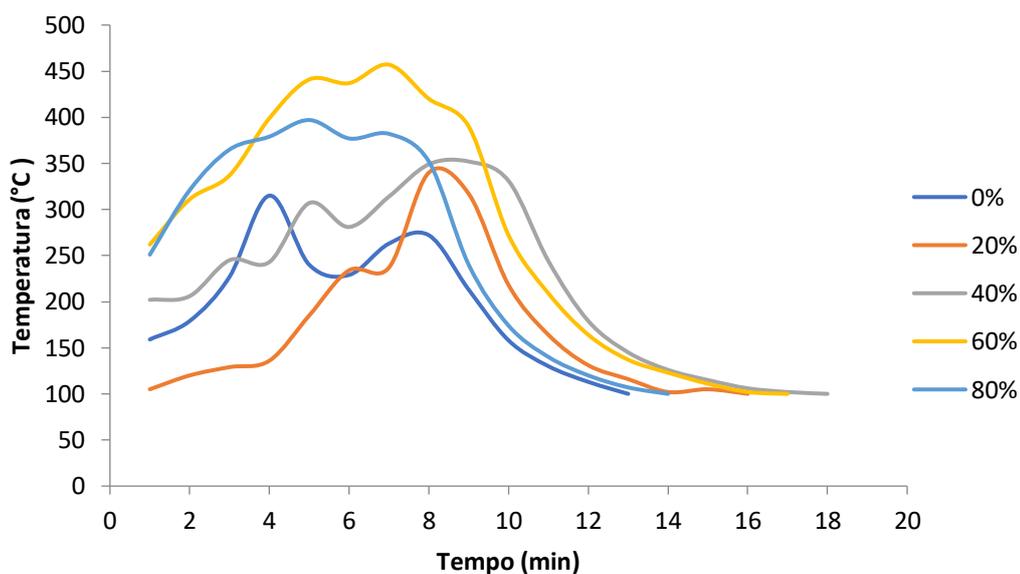
Fonte: Da autora (2021).

A análise das curvas permite observar que os painéis aglomerados produzidos com o acréscimo de cardanol foram mais resistentes à combustão. Nota-se que a curva de massa

correspondente ao tratamento 0% ficou em uma posição abaixo das demais, apresentando menor estabilidade térmica após a combustão. Constata-se também, que este tratamento apresentou um início de degradação em um tempo menor. Logo, os painéis produzidos com cardanol apresentaram maior dificuldade em iniciar o processo de combustão, uma vez que este subproduto possui anel aromático e proporciona boas propriedades térmicas (GRECO et al., 2010).

A Figura 15 apresenta a variação da temperatura de acordo com o tempo de combustão dos painéis aglomerados. Percebe-se que os maiores picos de temperaturas foram obtidos para os tratamentos com maiores proporções de cardanol, devido a maior quantidade de energia liberada na oxidação dos painéis. Isso ocorre devido ao fato do cardanol apresentar anéis aromáticos e cadeia lateral carbônica longa, ou seja, a maior quantidade de carbono resulta em acréscimo da entalpia de combustão e o acréscimo da temperatura.

Figura 15 – Variação de temperatura com o tempo de combustão.



Fonte: Da autora (2021).

Nota-se que o maior aumento de temperatura ocorreu entre os minutos 5 e 7 para os tratamentos 60%, de 441 para 457° C. Já para o tratamento 0%, podemos perceber a baixa temperatura de combustão e a alta perda de massa dos painéis. No entanto, os painéis com maiores proporções de cardanol apresentaram maior resistência à combustão e, conseqüentemente, uma menor degradação quando expostos ao fogo, comprovando, assim,

o potencial do cardanol como retardante de chamas, uma vez que o cardanol possui alta resistência térmica (DASHTIZADEH; ABDAN; JAWAID, 2020).

Um estudo realizado por Shishlov et al. (2017), demonstrou que a síntese de adesivos bromo-cardanol em associação ao poliuretano, é uma boa alternativa para retardadores de chama em painéis aglomerados. Uma vez que os grandes números de retardadores de chama possuem o elemento químico bromo que é considerado tóxico e causa impacto no meio ambiente. Logo, a redução do bromo nos adesivos e sua baixa migração para o meio ambiente através do uso do cardanol se torna uma vantagem. Abrindo, portanto, possibilidades em produzir outros tipos de materiais compostos à base de madeira com propriedades retardantes de chamas, como em painéis de fibras, compensados ou laminados de madeira, com recursos renováveis e baixa emissão de formaldeído.

#### **4 CONCLUSÃO**

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a substituição da UF pelo cardanol nas propriedades físicas dos painéis ocasionou melhoria na umidade dos painéis. Já para a absorção de água, inchamento em espessura e taxa de não retorno de espessura, os valores das propriedades aumentaram, devido à falta de adesão às partículas com o acréscimo do cardanol aos painéis.

Conforme a norma CS 236-66 (CS, 1968) os resultados médios obtidos, indicam que é possível uma substituição em até 47% de cardanol a UF para a propriedade IE. E para as propriedades mecânicas, é aceitável uma substituição em até 10% para o MOE, 5% para o MOR e 31% para TP.

Para o teste de combustibilidade verificou-se boa resistência à chama dos painéis com maiores acréscimo de cardanol, demonstrando assim potencial para ser utilizado como retardante de chamas.

Logo, os resultados obtidos demonstram que é possível uma substituição em até 5% da UF pelo cardanol, atendendo assim, todas as normas estabelecidas para a comercialização dos painéis, o qual pode contribuir com a saúde da população e ao meio ambiente.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPG BIOMAT-UFLA), à empresa Resibras Cashol pela doação do cardanol, e ao Laboratório de Microscopia/UFRPE.

## REFERÊNCIAS

- ALAMSYAH, E. M.; SUTRISNO; NURYWAN, A.; WIDYORINI, R. Identifying best parameters of particleboard bonded with dextrin-based adhesives. **Open Agric.**, v. 5, n. 1, p. 345-351, 2020.
- ALMEIDA, N. F.; MORI, F. A.; GOULART, S. L.; MENDES, L. M. Estudo da reatividade de taninos de folhas e cascas de barbatimão *Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville. **Sci. For.**, v. 38, n. 87, p. 401-408, 2010.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI A208.1**: Mat formed wood particleboard: specifications. Gaithersburg, 1993.
- 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.
- 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.
- ANDRADE, L. M. F.; SCATOLINO, M. V.; FARIA, D. L.; CÉSAR, A. A.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Inclusão do resíduo de polpação da celulose na produção de painéis aglomerados de média densidade. **Sci. For.**, v. 46, n. 120, p. 626-637, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14810-2**: Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio 2018. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos – Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017.
- 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, A. M.; AL-HODAN, M. A.; HAMEED, R. S. A.; EZZAT, A. O. Preparation of green cardanol-based epoxy and hardener as primer coatings for petroleum and gas steel in marine environment. **Prog. Org. Coat.**, v. 111, p. 283-293, 2017.

AVERINA, E.; KONNERTH, J.; D'AMICO, S.; HERVIJNEN, H. W. G. V. Protein adhesives: Alkaline hydrolysis of different crop proteins as modification for improved wood bonding performance. **Ind. Crops Prod.**, v. 161, p. e113187, 2021.

AYDIN, I. **Effects of some manufacturing conditions on wettability and bonding of veneers obtained from various wood species**, 2004. 270 p. Thesis (Ph.D. in Forest Industrial Engineering) – Black Sea Technical University, Institute of Natural Science, Trabzon, Turkey, 2004.

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.

BARROS FILHO, R. M. Painéis aglomerados a base de bagaço de cana-de-açúcar e resinas uréia formaldeído e melamina formaldeído. 2009. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

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. **Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura**. 2014. 98 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2014.

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.

BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; NASSUR, O. A. C.; SÁ, V. A.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesqui. Florest. Bras.**, v. 32, n. 70, p. 129-137, 2012.

CAILLOL, S. Cardanol: A promising building block for biobased polymers and additives. **Curr. Opin. Green Sustain. Chem.**, v. 14, p. 26-32, 2018.

CARVALHO, A. G.; LELIS, R. C. C.; NASCIMENTO, A. M. Avaliação de adesivos à base de taninos de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* e de *Acacia mearnsii* na fabricação de painéis aglomerados. **Ciênc. Florest.**, v. 24, n. 2, p. 479-489, 2014.

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

CUNHA, A. B.; HILLESHEIM, V. S.; FERRARI, L. H.; GRUBERT, W. Propriedades físicas de painéis de partículas de média densidade de *Sequoia sempervirens*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, 8, 2014, Recife. **Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Pós-Graduação em Ciências Florestais**. Recife: Editora UFRPE, 2014. pp. 459-463.

DASHTIZADEH, Z.; ABDAN, K.; JAWAID, M. Mechanical properties enhancement of cardanol by hybridization with kenaf/recycled carbono. **Mech. Mater.**, v. 148, p. e103475, 2020.

DEVI, A.; SRIVASTAVA, D. Studies on the blends of cardanol-based epoxidized novolac type phenolic resin and carboxyl-terminated polybutadiene (CTPB), I. **Mater. Sci. Eng. A**, v. 458, p. 336-347, 2007.

FIORELLI, J.; LAHAR, F. A. R.; NASCIMENTO, M. F.; SAVASTANO JUNIOR, H.; ROSSIGNOLO, J. A. Painéis de partículas à base de bagaço de cana e resina de mamona – produção e propriedades. **Acta Sci. Technol.**, v. 33, n. 4, p. 401-406, 2011.

FONTANA, A.; GUERNELLI, S.; CRESCENZO, A. D.; PROFIO, P. D.; PALOMBA, F.; CRESCENTINI, L. D.; BASCHIERI, A.; AMORATI, R. Cardanol-like co-surfactants solubilized in pegylated micelles keep their antioxidant activity and preserve polyethylene glycol chains from oxidation. **J. Mol. Liq.**, v. 293, p. 1-9, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAO Statistical Pocketbook: World Food and Agriculture 2018**. Roma, 2018. Disponível em: < <http://www.fao.org/3/ca1796en/CA1796EN.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

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., Piracicaba**, v. 44, n. 111, p. 665-674, 2016.

FRIHART, C. R. Wood adhesion and adhesives. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton: CRC, 2005. pp. 215-278.

GHAHRI, S.; PIZZI, A. Improving soy-based adhesives for wood particleboard by tannins addition. **Wood Sci. Technol.**, v. 52, p. 261-279, 2018.

GRECO, A.; BRUNETT, D.; RENNA, G; MELE, G.; MAFFEZZOLI, A. Plasticizer for poly(vinyl chloride) from cardanol as a renewable resource material. **Polym. Degrad. Stab.**, v. 95, n. 11, p. 2169-2174, 2010.

HONG, M.-K.; PARK, B.-D. Effect of urea-formaldehyde resin adhesive viscosity on plywood adhesion. **J. Korean Wood Sci. Technol.**, v. 45, n. 2, p. 223-231, 2017.

HU, Y.; SCHANG, Q.; BO, C.; JIA, P.; FENG, G.; ZHANG, F.; LIU, C.; ZHOU, Y. Synthesis and Properties of UV-Curable Polyfunctional Polyurethane Acrylate Resins from Cardanol. **ACS Omega**, v. 4, n. 7, p. 12505-12511, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES. **Painéis de madeira**. 2017. Disponível em: <<https://iba.org/paineis-de-madeira>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

IWAKIRI, S. **Painéis de Madeira Reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

JANG, Y.; HUANG, J.; LI, K. A new formaldehyde-free wood adhesive from renewable materials. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 31, p. 754-759, 2011.

KHEDARI, J.; NANKONGNAB, N.; HIRUNLABH, J.; TEEKASAP, S. New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. **Build Environ.**, v. 39, n. 1, p. 59-65, 2004.

KHOSRAVI, S.; KHABBAZ, F.; NORDQVIST, P.; JOHANSSON, M. Protein-based adhesives for particleboards. **Ind. Crop Prod.**, v. 32, n. 3, p. 275-283, 2010.

LI, H.; GUO, H.; HUANG, N.; YE, J. Health risks of exposure to waste pollution: Evidence from Beijing. **China Econ. Rev.**, v. 63, p. e 101540, 2020.

LI, W.-S. J.; CUMINET, F.; LADMIRAL, V.; LACROIX-DESMAZES, P.; CAILLOL, S.; NEGRELL, C. Phosphonated and methacrylated biobased cardanol monomer: Synthesis, characterization and application. **Prog. Org. Coat.**, v. 153, p. e106093, 2021.

LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; CARNEIRO, A. C. O. Características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. **Cerne**, v. 13, n. 2, p. 123-129, 2007.

LIU, M.; WANG, Y.; WU, Y.; HE, Z.; WAN, H. "Greener" adhesives composed of urea-formaldehyde resin and cottonseed meal for wood-based composites. **J. Clean. Prod.**, v. 187, p. 361-371, 2018.

LOURENÇO NETO, G. R.; KOSCHIER, P. V.; SCHIMITZ, V. N.; CHAGAS, C. D.; OLIVEIRA, L. S.; FERREIRA, E. S. Propriedades físicas de painéis aglomerados produzidos com resíduos lignocelulósicos. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFPEL, 23, 2014, Pelotas. **Anais do XXIII Congresso de Iniciação Científica da UFPel**. Pelotas: Editora UFPel, 2014. pp. 1-4.

MACHADO, N. A. F.; FURTADO, M. B.; PARRA-SERRANO, L. J.; PARENTE, M. O. M.; FIORELLI, J.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Painéis aglomerados fabricados com resíduos do coco babaçu. **Rev. Bras. Ciênc. Agrár.**, v. 12, n. 2, p. 202-209, 2017.

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

MAZZETTO, S. E; LOMONACO, D; MELE, G. Óleo da castanha de caju: oportunidades e desafios no contexto do desenvolvimento e sustentabilidade industrial. **Quím. Nova**, v. 32, n. 3, p. 732-741, 2009.

MCGWIN JR., G.; LIENERT, J.; KENNEDY JR., J. I. Formaldehyde Exposure and Asthma in Children: A Systematic Review. **Environ. Health Perspect.**, v. 118, n. 3, p. 313-317, 2010.

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. e00114514, 2018.

MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; MENDONÇA, L. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; MORI, F. A. Qualidade de painéis aglomerados homogêneos produzidos com a madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 329-336, 2014.

MENDES, R. F.; VILELA, A. P.; FARRAPO, C. L.; MENDES, J. F.; TONOLI, G. H. D.; MENDES, L. M. Lignocellulosic residues in cement-bonded panels. In: SAVASTANO JUNIOR; H.; FIORELLI, J.; SANTOS, S. F. (Eds.). **Sustainable and Nonconventional Construction Materials Using Inorganic Bonded Fiber Composites**, Amsterdam: Elsevier, 2017. pp. 3-16.

MENDES, R.F.; MENDES, L. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, 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.

MI, Y.; SUN, Z.; GAO, D.; BAI, Y.; GAO, Z. Positive impact of carbohydrate on the crosslinking, performance, and potential applications of defatted soybean flour-based adhesive. **Int. J. Adhes. Adhes.**, v. 106, p. e102811, 2021.

MONISHA, M.; AMARNATH, N.; MUKHERJEE, S.; LOCHAB, B. Cardanol Benzoxazines: A Versatile Monomer with Advancing Applications. **Macromol. Chem. Phys.**, v. 220, n. 3, p. e1800470, 2019.

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

MÜZEL, S. D. **Madeira de *Hevea brasiliensis* como matéria prima para a produção de chapa de partículas aglomeradas**. 2013. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Itapeva, 2013.

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.

NASSER, S. M. **Painéis com partículas de madeira da espécie teca e casca de amendoim com adesivo à base de mamona.** 2019. 240 p. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2019.

NOURBAKHS, A.; BAGHLANI, F. F.; ASHORI, A. Nano-SiO<sub>2</sub> filled rice husk/polypropylene composites: physico-mechanical properties. **Ind. Crops Prod.**, v. 33, p. 183-187, 2011.

OLIVEIRA, S. L.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M.; NARCISO, C. R. P.; RIBEIRO, D. P. Avaliação não destrutiva de painéis de partículas de média densidade pelo método Stress Wave Timer. **Pesqui. Florest. Bras.**, v. 37, n. 91, p. 243-247, 2017.

OWODUNNI, A. A. et al. Adhesive application on particleboard from natural fibers: a review. **Polym. Compos.**, v. 41, n. 11, p. 1-13, 2020.

PAPADOPOULOU, E.; KOUNTOURAS, S.; NIKOLAIDOU, Z.; CHRISAFIS, K.; MICHAIOF, C.; KALOGIANNIS, K.; LAPPAS, A. A. Urea-formaldehyde (UF) resins prepared by means of the aqueous phase of the catalytic pyrolysis of European beech wood. **Holzforschung**, v. 70, n. 12, p. 1139-1145, 2016.

PARAMESWARAN, P. S.; ABRAHAM, B. T.; THACHIL, E. T. Cardanol-based Resol Phenolics – a Comparative Study. Progress in Rubber. **Prog. Rubber Plast. Recycl. Technol.**, v. 26 n. 1, p. 31-50, 2010.

PEREIRA, G. F.; RIOS, P. D’A.; BUSS, R.; VIEIRA, H. C.; GRUBERT, W.; CUNHA, A. B.; BELINI, U. L. Painéis de madeira aglomerada de *Eucalyptus badjensis* e *Pinus* spp. **Sci. For.**, v. 45, n. 114, p. 373-382, 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. Wood products and green chemistry. **Ann. For. Sci.**, v. 73, p. 185-203, 2016.

PIZZI, A. Recent developments in eco-efficient bio-based adhesives for wood bonding: opportunities and issues. **J. Adhes. Sci. Technol.**, v. 20, n. 8, p. 829-846, 2006.

PRASITTISOPIN, L.; LI, K. A new method of making particleboard with a formaldehyde-free soy-based adhesive. **Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.**, v. 41 n. 10 p. 1447-1453, 2010.

PUCHOT, L. **Cardanol: a bio-based building block for new sustainable and functional materials.** 2016. 198 p. Tese (Doutorado em Química de Materiais) – Université de Cergy Pontoise, França, 2016.

QUIRINO, W. F. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. 1991. 64 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

SANGEETHA N. J. Preparation and Properties of Cardanol-Formaldehyde Resole Resin. **J. Chem. & Cheml. Sci.**, v. 8, n. 3, p. 625-629, 2018.

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, 2017.

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.

SEGUNDINHO, P. G. A.; GONÇALVES, F. G.; GAVA, G. C.; TINTI, V. P.; ALVES, S. D.; REGAZZI, A. J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Rev. Mater.**, v. 22, n. 2, p. 1-13, 2017.

SETTER, C.; BORGES, F. A.; CARDOSO, C. R.; MENDES, R. F.; OLIVEIRA, T. J. P. Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. **Ind. Crops Prod.**, v. 154, p. e112731, 2020.

SHISHLOV, O.; DOZHDIKOV, S.; GLUKHIKH, V.; ELTSOV, O.; KRAUS, E.; ORF, L.; HEILIG, M.; STOYANOV, O. Synthesis of bromo-cardanol novolac resins and evaluation of their effectiveness as flame retardants and adhesives for particleboard. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 134, p. e45322, 2017.

SHUKLA, S. K.; SRIVASTAVA, K.; SRIVASTAVA, D. Studies on the Thermal, Mechanical and Chemical Resistance Properties of Natural Resource Derived Polymers. **Mat. Res.**, v. 18, n. 6, p. 1217-1223, 2015.

SILVA, B. M. F. CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS INDUSTRIALIZADOS DERIVADOS DA MADEIRA EMPREGADOS COMO SUPORTE EM OBRAS MODERNAS E CONTEMPORÂNEAS: a complexidade e interdisciplinaridade no âmbito da conservação de bens culturais. In: ROSADO, A.; FAZZOLARI, C.; FRONER, Y.-A. (Orgs.). **Arte concreta e vertentes construtivas: teoria, crítica e história da arte técnica**. Belo Horizonte: Editora ABCA, 2018. pp. 14-31.

SILVA, M. A.; SANTOS, P. V.; SILVA, G. C.; LELIS, R. C. C.; NASCIMENTO, A. M.; BRITO, E. O. Utilização de lignosulfonato e adesivo Fenol-Formaldeído na produção de painéis aglomerados. **Sci. For.**, v. 45, n. 115, p. 423-433, 2017.

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.

SORATTO, D. N.; CUNHA, A. B.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; COSTA, F. R. Efeitos da adição de cavaco com casca na qualidade de painéis MDP produzidos com *Eucalyptus* sp. **Braz. J. Wood Sci.**, v. 4, n. 1, p. 46-59, 2013.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. P. L. Panorama do sistema construtivo moldura em madeira leve no Brasil. **Ambiente. constr.**, v. 18, n. 3, p. 309-326, 2018.

SOUZA, A. M.; NASCIMENTO, M. F.; ALMEIDA, D. H.; SILVA, D. A. L.; ALMEIDA, T. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Wood-based composite made of wood waste and epoxy based ink-waste as adhesive: A cleaner production alternative. **J. Clean. Prod.**, v. 193, p. 549-562, 2018.

SOZIM, P. C. L.; NAPOLI, L. M.; FERRO, F. S.; MUSTEFAGA, E. C.; HILLING, E. Propriedades de painéis aglomerados produzidos com madeiras de *Ligustrum lucidum* e *Pinus taeda*. **Pesqui. Florest. Bras.**, v. 39, n. 1, p. 1-8, 2019.

STOFFEL, R. B.; FELISSIA, F. E.; CURVELO, A. A. S.; GASSA, L. M.; AREA, M. C. Optimization of sequential alkaline–acid fractionation of pine sawdust for a biorefinery. **Ind. Crops Prod.**, v. 61, p. 160-168, 2014.

SUWAN, A.; SUKHAWIPAT, N.; UTHAIPAN, N.; SAETUNG, A.; SAETNG, N. Some properties of experimental particleboard manufactured from waste bamboo using modified recycled palm oil as adhesive. **Prog. Org. Coat.**, v. 149, p. e 105899, 2020.

TERZI, E.; KARTAL, S.; MUIN, M.; HASSANIN, A.; HAMOUDA, T.; KILIÇ, A.; CANDAN, Z. Biological performance of novel hybrid green composite produced from glass fibers and jute fabric skin by the VARTM process. **BioRes.**, v. 13, n. 1, p 662-677, 2018.

TRIANOSKI, R.; PICCARDI, A. B. R.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M.; BONDUELLE, C. M. Incorporação de *Grevillea robusta* na Produção de Painéis Aglomerados de Pinus. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 278-285, 2016.

VIEIRA, H. C.; RIOS, P. D'A.; CUNHA, A. B.; KNISS, D. D. C.; GAA, A. Z. N.; RICARDO, G. C.; BALDUINO JUNIOR, A. L. Resíduo de cevada industrial para a produção de painéis aglomerados. **Rev. Ciênc. Agrovet.**, v. 19, n. 3, p. 365-372, 2020.

VINOD, B.; ANANDAJOTHI, M. Mechanical and tribological properties of abaca-roselle/cardanol formaldehyde hybrid composites. **Mater. Res. Express.**, v. 6, n. 2, p. e 125363, 2020.

VIVIAN, M. A.; SEGURA, T. E. S.; BONFATTI JÚNIOR, E. A.; SARTO, C.; SCHMIDT, F.; SILVA JÚNIOR, F. G.; GABOV, K.; FARDIM, P. Qualidade da madeira de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica kraft. **Sci. For.**, v. 43, n. 105, p. 183-191, 2015.