

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS CASAGRANDA

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES RESÓIS FENÓLICOS COMERCIAIS NA
COLAGEM DE PAINÉIS DE COMPENSADO**

FRANCISCO BELTRÃO

2022

LUCAS CASAGRANDA

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES RESÓIS FENÓLICOS COMERCIAIS NA
COLAGEM DE PAINÉIS DE COMPENSADO**

**Evaluation of different commercial phenolic resoles in the gluing of plywood
panels**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Wagner da Silveira.

Coorientador: Fábio Junkes Corrêa

FRANCISCO BELTRÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUCAS CASAGRANDA

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES RESÓIS FENÓLICOS COMERCIAIS NA
COLAGEM DE PAINÉIS DE COMPENSADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 05 de dezembro de 2022

Wagner da Silveira
Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais
Professor titular da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fabio Junkes Corrêa
Doutorado em Engenharia Mecânica
Professor titular da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rogério da Silva Santos
Doutorado em Biotecnologia
Professor titular da Universidade Federal da Grande Dourados

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso

FRANCISCO BELTRÃO

2022

Dedico este trabalho às pessoas à minha volta, pelo apoio incondicional em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

É impossível, em um mero texto, descrever e agradecer tudo e todos que fizeram parte dessa jornada, a qual tem este trabalho como estação final. Inicialmente, tenho que agradecer a Deus, o qual me confortou nos momentos mais difíceis e foi sempre minha base.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Wagner da Silveira, pelos conhecimentos repassados, por ser paciente e eloquente em todos os momentos, e ser mais que orientador, ser amigo.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram incondicionalmente em todos os momentos, dando amor, proteção e carinho.

A Aline, que sempre se fez presente, me amparando e sendo companheira em cada passo.

À minha família, que é meu ninho para todo e qualquer momento, deixando a vida ser mais leve.

Aos meus amigos pela parceria, tornando esses anos cheios de inúmeras boas memórias.

Aos colegas de trabalho, que sempre auxiliaram e se disponibilizaram a me ajudar, tornando esse sonho possível.

A empresa Polesello Industria Química, pela abertura para poder executar o trabalho em suas dependências, disponibilizando todos os recursos necessários para isso.

Por fim, meu agradecimento a todos que de uma forma ou de outra fizeram parte dessa caminhada de conhecimento e aprendizagem, tendo meu afeto, respeito e uma eterna dívida de gratidão.

*“Em algum lugar, algo incrível está
esperando para ser descoberto.”*

(SAGAN,1977)

RESUMO

As resinas fenólicas são fruto da reação de policondensação em fenol e formaldeído. Essa categoria de resinas é dividida em dois grupos, as novolacas e os resóis. Os resóis possuem várias características interessantes para a produção de painéis de compensado, por resistirem muito bem ao calor e à umidade, terem grande força de adesão às fibras de madeira e curar através do calor. O processo de fabricação para painéis de compensado pode ter diversas variações, logo, caracterizar e testar diferentes resinas em vários cenários de aplicação pode ajudar a compreender qual resina é mais adequada a cada processo produtivo. Para isso, foi efetuada a caracterização físico-química de cada resina, seguido pela construção de painéis de compensado com as três resinas, utilizando variações de gramatura e montagem pré-determinadas. A partir desses painéis, foram confeccionados corpos de prova dentro das normas vigentes para testes de ruptura por cisalhamento. Os corpos de prova sofreram estresse por vácuo-pressão ou fervura, sendo posteriormente rompidos para a avaliação de fibras visuais e tensão máxima antes da ruptura. Os resultados dos testes foram compilados em gráficos e planilhas a fim de avaliar o comportamento de colagem em cada um dos panoramas, além de ser realizada a descrição a respeito de qual resina se comportou melhor. Os resultados mostraram variações de desempenho das resinas dependendo do cenário de teste, o que pode qualificar melhor cada uma delas a depender do seu modo de uso. A resina A apresentou resultados melhores em tempos de montagem menores (até 4 h), tendo uma queda de desempenho a partir desse tempo. A resina B teve comportamento similar a resina B, porém com um desempenho melhor quando é usado uma gramatura maior de adesivo na colagem. Já a resina C teve um comportamento de colagem mais homogêneo independente do tempo de montagem, o que faz com que essa resina suporte maiores variações de processo. O estudo foi realizado em ambiente controlado, o que não reproduz todas as variáveis de uma produção em escala comercial. Testes usando um leque maior de variações podem exibir resultados com maior embasamento, caracterizando melhor o comportamento de cada resina.

Palavras-chave: resina; resol; polímeros; fenol.

ABSTRACT

Phenolic resins are the result of the polycondensation reaction in phenol and formaldehyde. This category of resins is divided into two groups: novolac and resole. Resole resins show several interesting characteristics when applied into the production of plywood panels, mainly due to their excellent resistance to heat and humidity. Moreover, they have great adhesion strength to wood fibers as well as the characteristic of curing through heat. The manufacturing process for plywood panels can vary greatly, and thus, characterizing and testing different resins in various application scenarios will help us to understand which resin is best suited for each production process. For this, the physical-chemical characterization test of each resin was carried out, followed by the construction of plywood panels using the three resins, using pre-determined variations in weight, and assembling process. From these panels, specimens were made within the current standards for shear rupture tests. The specimens were subjected into stress by vacuum-pressure or boiling, and afterwards, broken for the evaluation of visual fibers and maximum stress before breaking. The test results were compiled in graphs and spreadsheets to measure the bonding behavior in each of the scenarios, in addition to describing which resin behaved better. The results showed performance variations of the resins depending on the test scenario, which can better qualify each one of them depending on its use mode. Resin A showed better results in shorter assembly times (up to 4 h), with a drop in performance after that time. Resin B had a similar behavior to resin B, but with a better performance when a higher weight of adhesive was used in the bonding. Resin C, on the other hand, had a more homogeneous bonding behavior regardless of the assembly time, which makes this resin support greater process variations. The study was carried out in a controlled environment, which does not reproduce all the variables of a production on a commercial scale. Tests using a wider range of variations can show results with greater scientific results, thus better characterizing the behavior of each resin.

Keywords: resin; resole; polymers; phenol.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Reação entre fenol e formol formando uma novolaca.....	17
Figura 2 - Reação entre fenol e formol formando um resol fenólico.	18
Figura 3 - Reação de formação de um metilol fenol.	19
Figura 4 - Formação de metilol fenol em meio alcalino.	19
Figura 5 - Evolução da produção brasileira de compensados usando <i>pinus</i>	23
Figura 6 - Localização das plantas produtoras de compensados no Brasil.....	23
Figura 7 - Agitador e aquecedor com banho de glicerina para medir tempo de gel..	27
Figura 8 - pHmetro utilizado para caracterização do pH.....	28
Figura 9 - Copo Ford com abertura de 8 milímetros.	29
Figura 10 - Viscosímetro <i>Brookfield</i>	30
Figura 11 - Estufa com circulação de ar.	31
Figura 12 - Densímetro.....	32
Figura 13 - Medidor de umidade para madeiras.....	33
Figura 14 - Sistema de agitação por disco dispersor.....	34
Figura 15 - Emulsões de resina estabilizadas para colagem.....	34
Figura 16 - Prensa hidráulica com pratos maciços.	36
Figura 17 - Molde de um corpo de prova para teste de tração.	37
Figura 18 - Sistema de vácuo-pressão.	37
Figura 19 - Máquina de tração.....	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Percentual de fibras visuais da resina A.....	42
Gráfico 2 - Tensão de ruptura da resina A.	43
Gráfico 3 - Percentual de fibras visuais da resina B.....	45
Gráfico 4 - Tensão de ruptura da resina B.	46
Gráfico 5 - Percentual de fibras visuais da resina C.....	48
Gráfico 6 - Tensão de ruptura da resina C.	48
Gráfico 7 - Percentual de fibras visuais das resinas na gramatura de 160 g/m ²	50
Gráfico 8 - Resultados da tensão de ruptura na gramatura de 160 g/m ²	51
Gráfico 9 - Percentual de fibras visuais das resinas na gramatura de 190 g/m ²	52
Gráfico 10 - Resultados da tensão de ruptura na gramatura de 190 g/m ²	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização das resinas.....	40
Tabela 2 - Requisitos de colagem segundo a norma NBR 12466-2.....	41
Tabela 3 - Resultados do percentual de fibras visuais na resina A.	41
Tabela 4 - Resultados da tensão ruptura na resina A.	42
Tabela 5 - Resultados do percentual de fibras visuais na resina B.	44
Tabela 6 - Resultados da tensão de ruptura na resina B.	44
Tabela 7 - Resultados do percentual de fibras visuais na resina C.....	47
Tabela 8 - Resultados da tensão máxima de ruptura na resina C.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMCI	Associação Brasileira das Indústrias de Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira dos Produtores de Formol e Derivados
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
NBR	Normas Brasileiras
NIST	National Institute of Standards and Technology
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	Resina fenólicas	16
3.1.1	Histórico	16
3.1.2	Mercado Mundial de resinas fenólicas	16
3.1.3	Tipos de resina fenólica.....	17
3.1.3.1	Novolaca	17
3.1.3.2	Resol	17
3.2	Características de um resol	20
3.3	Matérias-primas	20
3.3.1	Fenol	20
3.3.2	Formaldeído	21
3.3.3	Catalisadores.....	21
3.3.4	Aditivos.....	22
3.4	Reator	22
3.5	Painéis de madeira compensada	22
3.5.1	Mercado brasileiro	23
3.5.2	Mercado mundial	25
4	Metodologia	26
4.1	Materiais e equipamentos	26
4.2	Caracterização das resinas	26
4.2.1	Determinação do tempo de gel	26
4.2.2	pH.....	27
4.2.3	Viscosimetria em Copo Ford	28
4.2.4	Viscosimetria em <i>Brookfield</i>	29
4.2.5	Teor de não voláteis	30
4.2.6	Densidade	31
4.3	Preparação das lâminas	32
4.4	Colagem	33
4.4.1	Preparação da emulsão de resina.....	33

4.4.2	Aplicação	35
4.5	Prensagem e cura.....	35
4.6	Preparação dos corpos de prova.....	36
4.7	Teste de vácuo-pressão.....	37
4.8	Teste de ebulição	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1	Caracterização	40
5.2	Testes de cisalhamento	40
5.2.1	Resina A.....	41
5.2.2	Resina B.....	44
5.2.3	Resina C.....	47
5.3	Avaliação comparativa entre as resinas	49
5.3.1	Gramatura de 160 g/m ²	49
5.3.2	Gramatura de 190 g/m ²	51
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
	REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

As resinas fenólicas advêm da reação de policondensação entre fenol e formaldeído. O tipo de polímero formado depende do catalisador utilizado, relação molar entre fenol e formol, pH e temperatura de reação. As resinas fenólicas estão divididas em dois grupos: as resinas novolaca, que utilizam um catalisador ácido e relação molar com excesso de fenol e as resóis, que usam um catalisador alcalino e relação molar com excesso de formol (PIZZI; MITTAL, 2003).

Os resóis fenólicos são amplamente usados na fabricação de painéis compensados, devido às características que a utilização desse tipo de resina proporciona, como: alta durabilidade, resistência à umidade e ao calor, força de adesão e cura controlável através do calor (PIZZI, 1994).

A fabricação e utilização painéis compensados remonta ao antigo Egito, onde eram feitos a partir de resinas de origem animal. Esse mercado começou a ganhar amplitude a partir do surgimento das primeiras resinas sintéticas, as quais melhoraram as propriedades de colagem e as possibilidades de produção em grande escala. Porém, o uso dessa classe de materiais só ganhou notoriedade a partir da segunda grande guerra, quando os processos industriais de síntese das matérias-primas foram aprimorados e a consequente busca e uso deles se tornou primordial em inúmeras áreas (SELLERS JR., 1985).

A resina utilizada e os cenários de aplicação e fabricação de um painel compensado influenciam, diretamente, no desempenho do painel, podendo ou não qualificar ele para uso. Dessa forma, esse trabalho tem por objetivo verificar a influência da utilização de três resóis fenólicos diferentes, com variação nas condições de fabricação, a fim de analisar a sua influência na obtenção de um produto que atenda às necessidades de mercado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Caracterizar e avaliar o desempenho de três resóis fenólicos comerciais na colagem de painéis de madeira compensada em diferentes cenários de aplicação.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar as características físico-químicas (viscosidade, teor de não voláteis, tempo de gel, pH e densidade) dos resóis fenólicos utilizados;
- Produzir painéis de madeira compensada através de variáveis de processo controladas;
- Preparar e analisar corpos de prova a partir dos painéis produzidos;
- Medir a resistência das colagens;
- Avaliar o desfibramento das amostras e verificar a linha de colagem;
- Analisar criticamente os resultados e sugerir cenários mais adequados de aplicação dos resóis fenólicos para obtenção de uma linha de colagem com melhor desempenho.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Resina fenólicas

As resinas fenólicas são polímeros com características de serem resistentes à água, altas temperaturas e agressão por produtos químicos. Elas possuem cor opaca, variando de uma tonalidade amarelada ao vermelho escuro. Também foram as primeiras resinas sintéticas a serem produzidas comercialmente (PILATO, 2010).

3.1.1 Histórico

As resinas fenólicas são resultantes da policondensação entre fenol e formaldeído. Essa reação de síntese formou o primeiro polímero sintético comercialmente viável. Apesar de haver estudos anteriores, foi Leo H. Baekeland, em 1907, que patenteou o primeiro processo de produção de uma resina fenólica. O resultado da reação gerava uma resina com estabilidade que podia ser endurecida através de pressão e calor, esta resina foi chamada comercialmente como baquelite (CRESPY; BOZONNET; MEIER, 2008).

Seguindo os passos de Baekeland, foram desenvolvidas diversas resinas e aplicações e essas atendem a diversos segmentos de mercado, como: produção de compensados, moldes para fundição, espumas fenólicas, isolamentos térmicos e acústicos, baquelites, refratários, entre outros (PIZZI; MITTAL, 2003).

3.1.2 Mercado Mundial de resinas fenólicas

A utilização de resinas fenólicas foi sendo amplificada com o passar das décadas, encontrando-se novos usos para essa classe de polímeros. Com isso, construiu-se toda uma base industrial e de mercado, tornando-a essencial para a produção de diversos produtos industriais (PILATO, 2010).

O consumo mundial de resinas fenólicas atingiu a marca de 5 milhões de toneladas em 2008, tendo um crescimento constante e perspectivas futuras otimistas devido a seu custo-benefício e versatilidade de aplicações. Embora seja um volume grande, essa classe representa apenas 2 % do mercado mundial de polímeros, que

corresponde a uma produção de cerca de 250 milhões de toneladas anuais, tendo potencial de angariar mais espaço no setor (PILATO, 2010).

3.1.3 Tipos de resina fenólica

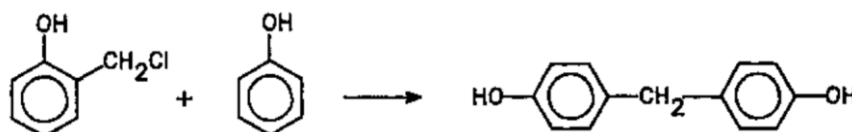
Essa classe de resinas é, tipicamente, subdividida em dois grupos: os resóis ou resinas de um estágio; e as novolacas ou resinas de dois estágios (IBEH; PIZZI 2022).

3.1.3.1 Novolaca

As resinas fenólicas novolacas são conhecidas como resinas de dois estágios, elas são termoplásticas, fundindo com aplicação de calor sem reticular. Essa classe necessita de um endurecedor para que ocorra sua cura, e o agente mais utilizado para tal propósito é a hexametiltetramina. Elas são obtidas pela reação de fenol e formaldeído, usando uma relação molar, contendo excesso de fenol e um catalisador ácido. Os catalisadores mais utilizados são o ácido oxálico, ácido sulfúrico, ácido clorídrico e o ácido tolueno sulfônico (PUZARI, 2010).

A Figura 1 representa a reação para formação de uma resina do tipo novolaca, onde é utilizada uma catálise ácida feita com ácido clorídrico.

Figura 1 - Reação entre fenol e formol formando uma novolaca.



Fonte: Adaptado de Pizzi; Mittal (2003).

3.1.3.2 Resol

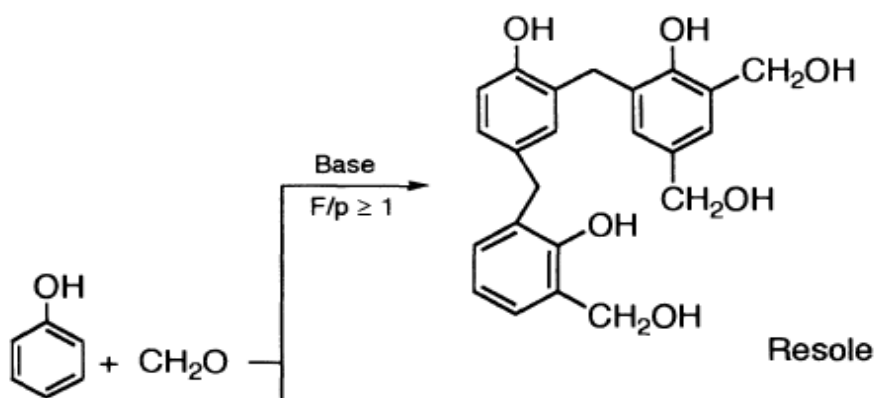
Um resol fenólico é produzido em uma reação de policondensação entre fenol e formaldeído, tendo uma relação molar com excesso de formaldeído em um meio de catálise alcalino. No início da reação, há uma rápida formação de metilol seguida de um lento processo de condensação. No processo de condensação, ocorre a ligação

do formol no carbono orto ou para do anel benzênico do fenol. Esse tipo de resina também é conhecida como resina de um estágio (PARAMESWARAN, 2009).

O formol se liga na posição orto ou para do anel benzênico do fenol, onde o excesso de formol varia entre 1:1 mol até 3:1 mols, dependendo do tipo de resol fenólico a ser produzido. Pela teoria, a proporção de formol para a reticulação completa do fenol é de 1,5 mols de formol para cada mol de fenol. Essa proporção varia para atender as características específicas de cada tipo de resina (SRIVASTAVA *et al.*, 2007).

A reação de formação de um resol é demonstrada pela Figura 2, onde ocorre a reação química entre formaldeído e fenol com uma relação molar onde há excesso de formol sendo catalisado por uma base.

Figura 2 - Reação entre fenol e formol formando um resol fenólico.

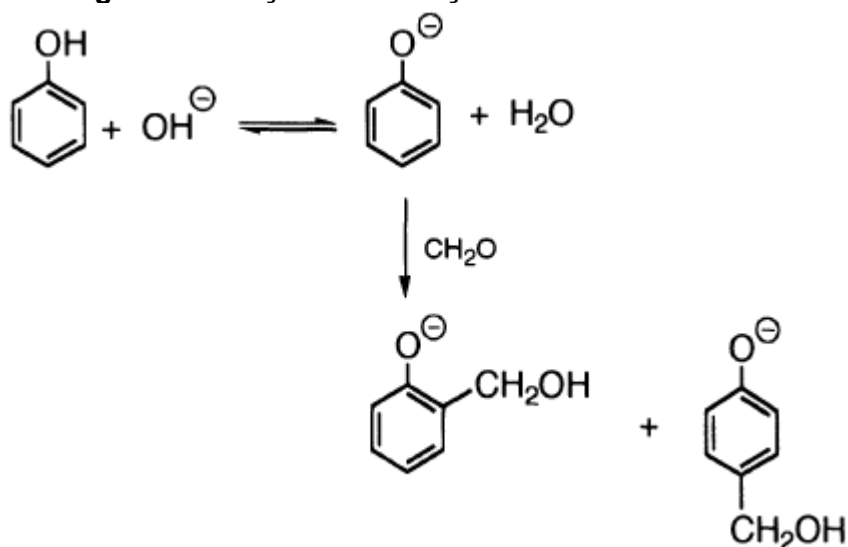


Fonte: Adaptado de Gardziella; Pilato; Knop (2000).

A formação de uma resina fenólica é iniciada pela formação do orto ou para metilol fenol, quando, em condições alcalinas, ocorre a adição do formaldeído ao fenolato (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 2000).

A Figura 3 demonstra como ocorre essa reação, onde, inicialmente, uma hidroxila se liga a um hidrogênio do fenol gerando uma molécula de água e criando uma instabilidade na molécula de fenol. Esse processo possibilita, na sequência, a ligação de uma molécula de formaldeído na posição orto ou para do fenolato (GARDZIELLA; PILATO; KNOP, 2000).

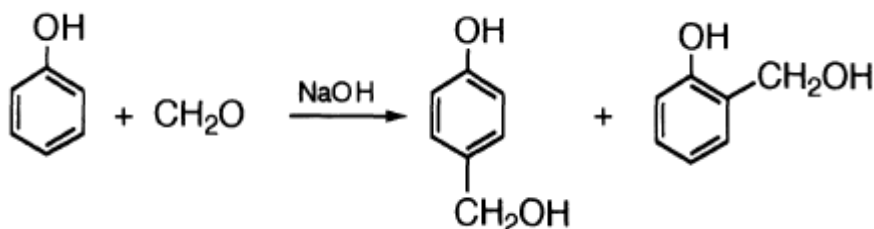
Figura 3 - Reação de formação de um metilol fenol.



Fonte: Adaptado de Gardziella; Pilato; Knop (2000).

A reação de formação de um metilol fenol pode ser vista de uma forma mais direta e simplificada na Figura 4, onde, em meio líquido, se mistura fenol e formaldeído catalisado com hidróxido de sódio, levando à formação de orto ou para metilol fenol.

Figura 4 - Formação de metilol fenol em meio alcalino.



Fonte: Adaptado de Gardziella; Pilato; Knop (2000).

O processo de polimerização de uma resina fenólica passa por três etapas. Na etapa 1, a de formação dos polímeros, a resina é termofixa, solúvel e fusível. Ela possui um peso molecular baixo a médio, contendo vários grupos polares, sendo solúvel em álcool. Na segunda etapa desse processo, a resina deixa de ser solúvel, além de tornar-se infusível, isso ocorre devido às condições de aquecimento que causam estágios intermediários de mudança. Já no estágio três, a resina ganha mais temperatura, reticulando os polímeros, tornando-a sólida ou curada (JAWAID; ASIM, 2021).

3.2 Características de um resol

Os oligômeros de policondensação alcalina entre fenol e formol são ótimos adesivos para colagem de madeira. Esse tipo de resina necessita de um alto teor de álcali (em torno de 8,5%), o que reduz o tempo de cura. No entanto, ele pode ser ajustado através da viscosidade, sendo que, com a diminuição da viscosidade da resina, o tempo de cura aumenta (PIZZI, 1994).

Elas podem ser solidificadas utilizando ácidos ou álcalis, ou mesmo curarem sem a presença de catalisadores, utilizando apenas temperatura. No processo de cura, é necessário utilizar altas pressões devido à presença de pequenas moléculas que podem se separar nessa fase (NEMOTO; AMIR; KONISHI, 2009).

O tempo de cura acaba afetando, diretamente, no processo de produção dos painéis de compensado, onde tempos de cura baixos fazem com que a linha de colagem chegue seca no processo de prensagem, prejudicando sua qualidade. Do mesmo modo, se o tempo de cura for alto, haverá a necessidade de um maior tempo de prensagem, influenciando, diretamente, na produtividade (PIZZI, 1994).

Os resóis fenólicos possuem uma vida útil menor do que as novolacas em razão do excesso de formol, onde o formol livre acelera a copolimerização. Esse processo também varia de acordo com outros fatores, como o pH, a temperatura de armazenamento e a presença de aceleradores de cura como carbonato de sódio, hexametiltetramina, entre outros (PIZZI; MITTAL, 2003).

3.3 Matérias-primas

3.3.1 Fenol

O monômero de uma resina fenólica é o fenol, esse, ao final do século XIX, era obtido através do alcatrão de carvão. Com o aumento da demanda mundial, ele passou a ser obtido sinteticamente através da sulfonação e cloração do benzeno, técnica que foi usada até a segunda grande guerra. Passado esse período, surgiu uma nova técnica de obtenção que é utilizada até os tempos atuais, onde o fenol é obtido, majoritariamente, pelo processo Hock. Nesse processo, o cumeno é oxidado

e após catalisado com um ácido forte, produzindo fenol e acetona (ZAKOSHANSKY, 2007).

No Brasil, existe apenas uma planta de produção de fenol, localizada em Paulínia, Estado de São Paulo, sendo a responsável pela maior parte da oferta desse insumo em solo nacional. Um percentual menor do consumo é atendido pela importação, porém, as sazonalidades e a logística fazem com que o uso do insumo importado seja menos representativo no mercado.

3.3.2 Formaldeído

O formaldeído pertence à classe dos aldeídos, foi descoberto em 1859 por Butlerov, sendo produzido em escala comercial desde o início do século XX. O formaldeído é obtido através do metanol, o qual é catalisado por óxido de prata ou de molibdênio, gerando o formaldeído como resultado. Essa reação ocorre em uma torre preenchida por catalisador e aquecida entre 600 °C e 650 °C, nela entra o metanol e saem, como produtos, formaldeído, água e hidrogênio (PILATO, 2010).

O país possui várias plantas de produção de formaldeído, com uma capacidade instalada para produção anual de até 1.730.600 toneladas em 2021. As plantas produtivas estão localizadas, majoritariamente, na região centro-sul do Brasil e atendem aos mais diversos segmentos, com destaque para a produção de resinas (ABRAF, 2022).

3.3.3 Catalisadores

A reação de formação de um resol fenólico ocorre em meio alcalino, podendo serem utilizados diferentes catalisadores na reação. O mais comumente utilizado é o hidróxido de sódio, devido à sua eficiência de catálise e seu menor custo. Porém, também podem ser utilizados o hidróxido de bário, hidróxido de cálcio, trietilamina, amoníaco, entre outros, a depender das características finais do produto a ser obtido, ou outros fatores inerentes (WALE *et al.*, 2020).

3.3.4 Aditivos

Uma gama de aditivos pode ser utilizada na produção de um resol fenólico, os quais dão características únicas ao produto. Esses aditivos contribuem com propriedades úteis na resina, como: aumentar a tolerância de utilização em processos industriais, acentuar características que melhorem a eficiência produtiva, entre outras (PIZZI; MITTAL, 2003).

Nos resóis fenólicos para colagem de madeira existem aditivos que são tipicamente utilizados, sendo eles: as resinas amínicas, polímeros de uréia-formaldeído, melamina-formaldeído, dimetilol ureia, trimetilol melamina e hexametilol melamina. Tais aditivos melhoram propriedades, como: a aderência da resina, a tolerância ao tempo de montagem, redução no tempo de prensagem, entre outras funcionalidades (PIZZI; MITTAL, 2003).

3.4 Reator

Os reatores utilizados para produção dessas resinas, geralmente, são construídos em aço inoxidável e podem ser revestidos de vidro se a fabricação do tipo de resina requisitar o uso de ácido clorídrico. O reator deve conter um bom sistema de agitação, sistema de descarga pelo fundo do reator e sistema de resfriamento. O sistema de resfriamento é constituído, geralmente, por uma camisa externa que circunda o reator e uma serpentina interna com circulação de água. Também é comum ter um trocador de calor casco e tubos, acoplado ao reator, o que auxilia no controle da reação, pois ela possui a característica de ser muito exotérmica (OTHMER, 2007).

3.5 Painéis de madeira compensada

A produção de painéis de madeira compensada remonta ao antigo Egito, onde rasps de madeira eram coladas com cola de origem animal com o propósito de moldar mobiliários à época. Com o passar dos séculos, outras técnicas de colagem para lâminas de madeira foram surgindo, porém, sem alcançar uma escala expressiva de produção (SELLERS JR., 1985).

A produção comercial para compensados começou a partir do século XX, com a síntese de resinas sintéticas e equipamentos específicos para laminação de madeira. A grande virada para essa indústria ocorreu após a segunda grande guerra, proveniente de necessidades de mercado, ampliando a gama de aplicações e os volumes consumidos. Acabou consolidando-se como um setor industrial vital para diversas áreas da economia, destacando-se a construção civil, mobiliários, embalagens, uso em embarcações e interior de veículos (WILK, 2017).

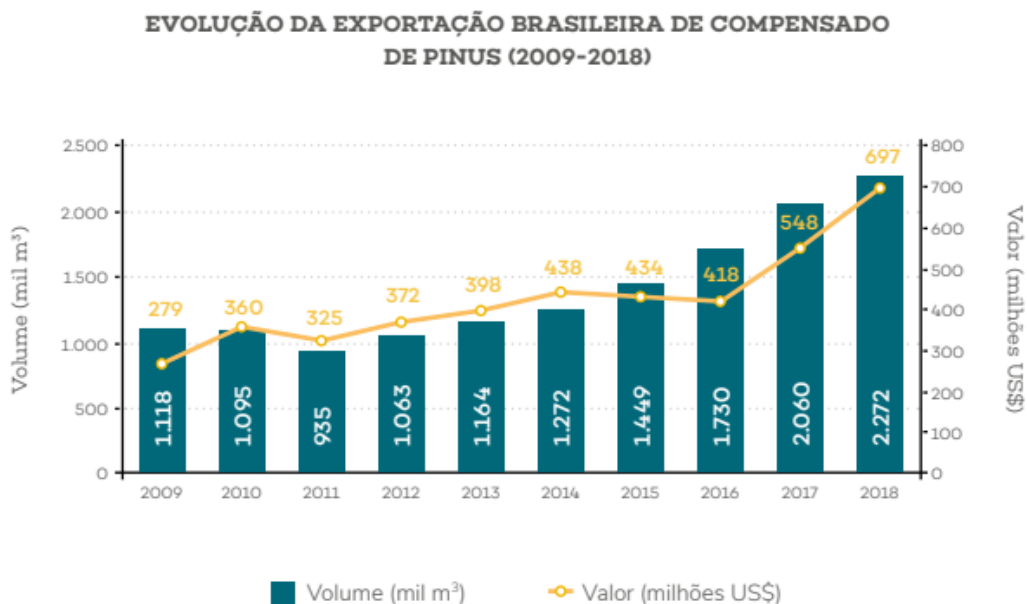
3.5.1 Mercado brasileiro

A produção de painéis de madeira compensada é um dos principais segmentos do mercado florestal brasileiro, tornando o Brasil o sétimo maior produtor mundial. As indústrias que compõem esse segmento se concentram no centro-sul do país. Dentro do segmento de painéis de madeira, os de madeira compensada representam 26 % da produção. Isso totaliza um volume produzido 2,7 milhões de m³ em 2017, sendo que, desse total, 1,8 milhões de m³ foram exportados. Tal mercado, historicamente, apresenta flutuações de produção, mas com uma tendência de aumento nos volumes produzidos devido à expansão das áreas reflorestadas no país, assim, o Brasil tornou-se um importante fornecedor mundial (SANQUETTA *et al.*, 2020).

O Brasil se consolidou nas últimas décadas como um importante exportador de compensados, assumindo papel de relevância no setor. Em 2018, o país era líder nas exportações mundiais, correspondendo por 18 % das vendas, totalizando 3,7 bilhões de dólares (ABIMCI, 2019).

Como pode ser visto na Figura 5, há uma tendência de aumento tanto de produção como de faturamento com as exportações de compensados produzidos a partir de *pinus*.

Figura 5 - Evolução da produção brasileira de compensados usando *pinus*.

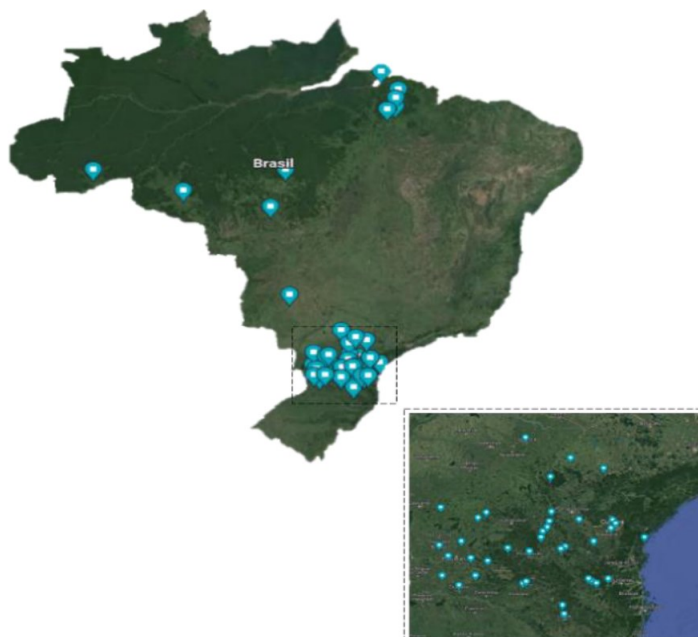


Fonte: Adaptado de ABIMCI (2019).

A produção se concentra na região sul do país, com destaque para Paraná e Santa Catarina. O destino dessa produção é, principalmente, a América do Norte, Europa Ocidental e Leste Asiático (VIEIRA; BRITO; GONÇALVES, 2012).

A Figura 6, mostra a localização de parte das plantas produtoras de compensados do país, onde é vista essa concentração das indústrias na região sul.

Figura 6 - Localização das plantas produtoras de compensados no Brasil.



Fonte: Adaptado de LIMA (2022).

3.5.2 Mercado mundial

O mercado mundial de compensados tem uma trajetória ascendente nos volumes de produção desde o final da Segunda Guerra Mundial, onde, à época, o maior produtor era os Estados Unidos. O mercado sofreu flutuações com crises mundiais e outros fatores que afetaram a demanda e, nessa conjuntura, houve mudanças significativas em respeito aos países que mais produzem compensados no mundo (VIEIRA; BRITO; GONÇALVES, 2012).

A China se tornou o maior produtor mundial, tendo um grande crescimento nos volumes de produção nas últimas duas décadas, devido ao grande consumo doméstico, hoje correspondendo por mais de 70 % da produção mundial. Outros países com significância na produção mundial são os Estados Unidos, Rússia, Indonésia, Malásia e o Brasil (WBPI, 2018).

4. METODOLOGIA

4.1 Materiais e equipamentos

As lâminas de madeira utilizadas na confecção das chapas de compensado são da espécie *Pinus elliotti*, provenientes de reflorestamento.

As resinas usadas no estudo foram doadas pela empresa Polesello Indústria Química, localizada no município de Vitorino, Estado do Paraná. Essas resinas fenólicas são produzidas para a colagem de lâminas de madeira. Neste estudo, elas receberam os nomes de resina fenólica A, B e C.

4.2 Caracterização das resinas

As características das resinas foram obtidas através de diversas análises laboratoriais. A metodologia para execução destes testes foi cedida pela empresa Polesello Indústria Química e se referem a métodos internos de análise.

4.2.1 Determinação do tempo de gel

A determinação do tempo de gel das resinas foi feita em um banho de glicerina a 121 ± 2 °C, este equipamento está exposto na Figura 7. Para o teste, pesou-se $5 \pm 0,1$ g de resina dentro de um tubo de ensaio. Em seguida, foi inserida uma haste de inox dentro desse tubo que foi acondicionado dentro do banho de glicerina, de modo que se cobriu o nível de amostra. Imediatamente, foi acionado um cronômetro e agitada a amostra por 60 s. Posteriormente, a haste foi girada por, no máximo, 10 s a cada minuto decorrido. Quando a resina atingiu o ponto de goma, girou-se continuamente e suavemente a haste de inox até o ponto em que a amostra (resina) não escoasse pela curvatura da haste. Assim, imediatamente, travou-se o cronômetro e anotou-se o tempo.

Figura 7 - Agitador e aquecedor com banho de glicerina para medir tempo de gel.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.2.2 pH

Ajustou-se a temperatura da amostra para 25 ± 1 °C. Assim, com o eletrodo do pHmetro já lavado com água deionizada e seco, foi mergulhada na resina, de modo que a amostra cobrisse o bulbo inferior do eletrodo. Depois, aguardou-se a estabilização do valor de leitura e foi anotado o valor obtido. O pHmetro utilizado para realizar esta análise está na Figura 8.

Figura 8 - pHmetro utilizado para caracterização do pH.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.2.3 Viscosimetria em Copo Ford

Utilizando um béquer, foi adicionado, aproximadamente, 150 g de resina e ajustada à temperatura em um banho termostático para 25 °C. A resina foi adicionada no viscosímetro Copo Ford, com abertura de 8 mm, já nivelado, tampando o orifício de escoamento do viscosímetro. Com um bastão de vidro, a resina foi nivelada ao limite do viscosímetro, deixando-a escoar pelo orifício do viscosímetro, acionando o cronômetro que foi pausado quando o orifício de escoamento do viscosímetro ficou visível pela parte de dentro do mesmo e em seguida foi anotado o tempo. Após, foi realizada a limpeza do Copo Ford e repetido o procedimento em duplicata. O viscosímetro Copo Ford empregue nessa análise está disposto na Figura 9.

Figura 9 - Copo Ford com abertura de 8 mm.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.2.4 Viscosimetria em *Brookfield*

Foi adicionado, aproximadamente, 50 g de resina em um béquer e, com auxílio de termômetro e banho termostático, ajustando a temperatura para 25 °C. Então, foi adicionada a resina ao viscosímetro *Brookfield* e utilizado o *Spindle* número 18, submergindo a haste até a marca indicada no eixo. Em seguida, foi ligado o giro do *Spindle*, ajustando a velocidade de acordo com a viscosidade da resina. Após estabilizada a leitura na escala, foi travado o giro do viscosímetro e desligado o aparelho. Nesse momento, foi efetuada a leitura da escala correspondente e anotado o valor. Para ser obtido o resultado em centipoises (cPs), o valor encontrado foi multiplicado pelo fator de correção da haste utilizada no ensaio. Está disposto na Figura 10 o viscosímetro Brookfield usado neste teste.

Figura 10 - Viscosímetro Brookfield.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.2.5 Teor de não voláteis

Foram utilizados 3 cadinhos de aço inox previamente dessecados para se obter um resultado em triplicata, sendo o resultado da análise a média dos valores finais. Nesses cadinhos, foram pesados $1,0 \pm 0,1$ g de amostra e levados para estufa de aquecimento com circulação de ar à temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 3 h, essa estufa é mostrada na Figura 11. Após esse período, retirou-se da estufa os cadinhos e colocou-se em um dessecador. Em seguida, foi estabilizada a temperatura dos cadinhos em relação à temperatura ambiente, sendo pesados novamente em balança analítica, calculando-se o teor de não voláteis pela variação do peso dos cadinhos.

Figura 11 - Estufa com circulação de ar.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.2.6 Densidade

Adicionou-se 250 ml de resina em um béquer com auxílio de termômetro e o banho termostático foi ajustado à temperatura do material a 20 °C. Então, a resina foi colocada em uma proveta 250 ml e foi introduzido o densímetro lentamente. Subsequentemente, realizou-se a leitura e anotação do resultado. O densímetro usado neste teste está disposto na Figura 12.

Figura 12 - Densímetro.

Fonte: Autoria própria (2022).

4.3 Preparação das lâminas

As lâminas de madeira foram cortadas na dimensão de 30 cm² e posteriormente levadas a uma estufa com circulação de ar à temperatura de 63 °C para ajuste de umidade do material (a estufa utilizada foi a retratada na Figura 11). Durante o período de secagem, mediu-se periodicamente a umidade com um medidor de umidade para madeiras, até o material estar com uma umidade máxima de 8 %. As lâminas foram resfriadas e acondicionadas em plástico filme para não haver um novo aumento de umidade nas amostras. A Figura 13 mostra o medidor de umidade para madeiras utilizado.

Figura 13 - Medidor de umidade para madeiras.



Fonte: Autoria própria (2022).

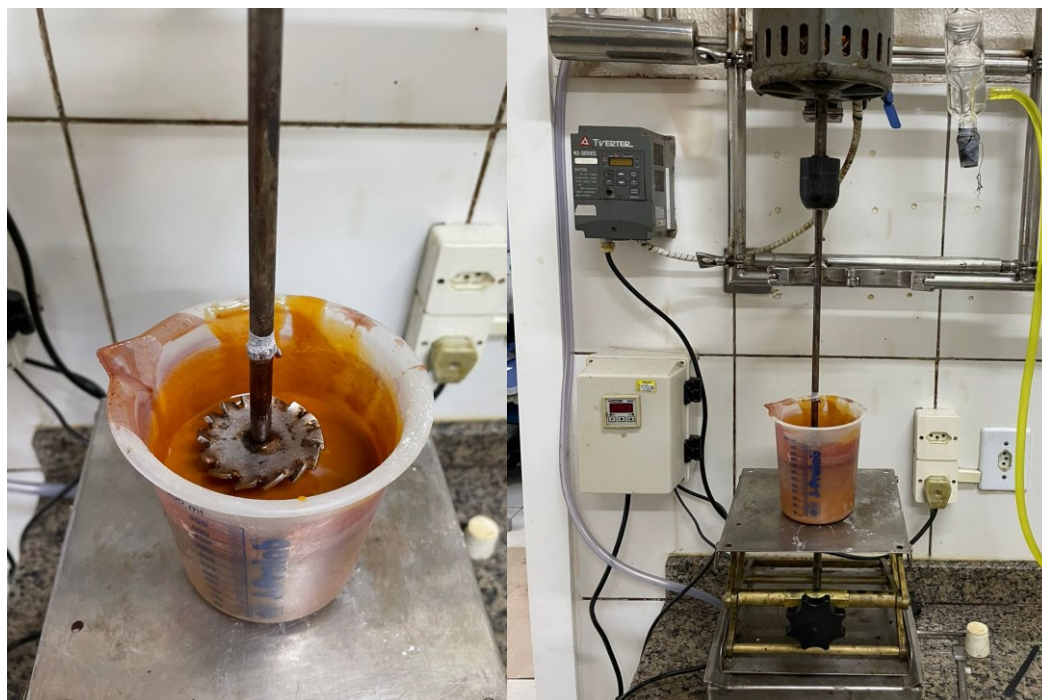
4.4 Colagem

4.4.1 Preparação da emulsão de resina

As amostras foram coladas usando como base as informações contidas no boletim técnico de cada uma das resinas.

A resina foi misturada em um agitador de disco dispersor a velocidade de 1400 rpm pelo período de 10 min. Para formar a emulsão de adesivo, foram utilizadas 300 g de resina, 100 g de farinha de trigo e 100 g de água. A Figura 14 apresenta o sistema de agitação por disco dispersor utilizado.

Figura 14 - Sistema de agitação por disco dispersor.



Fonte: Autoria própria (2022).

Após prontas, essas misturas foram deixadas descansando por 3 h, agitando-as a cada 30 min para a estabilização da viscosidade da batida (a viscosidade da batida sofre variações durante um período até que se estabilize). Foi medida a viscosidade de cada uma das bateladas em Copo Ford, com abertura de 8 mm na temperatura de 25 °C. O adesivo deve ter uma viscosidade de 150 ± 10 s para obtenção de um resultado satisfatório no seu uso. Após esse teste, o adesivo foi aplicado nas lâminas de madeira. A Figura 15 mostra os adesivos preparados para fazer a colagem.

Figura 15 - Emulsões de resina estabilizadas para colagem.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.4.2 Aplicação

Utilizando as lâminas com dimensão de 30 cm², o adesivo foi aplicado em uma das faces da lâmina; após a aplicação, colocou-se uma segunda lâmina sobreposta à face da lâmina que contém o adesivo, com o sentido das fibras da madeira em um ângulo de 90° em relação à primeira lâmina. Então, foi aplicado o adesivo nesta segunda lâmina de madeira. Após essa segunda aplicação, colocou-se uma terceira lâmina de madeira sobreposta com o sentido das fibras da madeira na direção perpendicular à primeira lâmina.

Para medir a eficiência da colagem utilizando quantidades diferentes do adesivo, a quantidade aplicada em cada uma das camadas foi variada. Na primeira variação, foi utilizada a quantidade de 160 g/m² em cada uma das camadas, repetindo o processo com cada uma das três resinas. Já, na segunda variação, foi utilizada a quantidade de 190 g/m² em cada linha de colagem.

4.5 Prensagem e cura

O composto de lâminas foi primeiramente prensado a frio utilizando a pressão de 9 kgf/cm², com um tempo de prensagem de 6 min. Após essa etapa, o tempo de espera até a prensagem a quente variou. O primeiro teste foi feito usando o tempo de espera de 1 h, no segundo teste, o tempo de espera foi de 4 h, e no terceiro teste, o tempo aumentou para 8 h.

Para a prensagem a quente foi utilizada a mesma prensa, ela estava a 135 °C. O tempo de prensagem seguiu a proporção de 1 min/mm de espessura do painel compensado montado, e como os painéis tinham 9 mm de espessura, o tempo de prensagem foi de 9 min.

A Figura 16 apresenta a prensa hidráulica usada para fazer a prensagem dos painéis de compensado.

Figura 16 - Prensa hidráulica com pratos maciços.

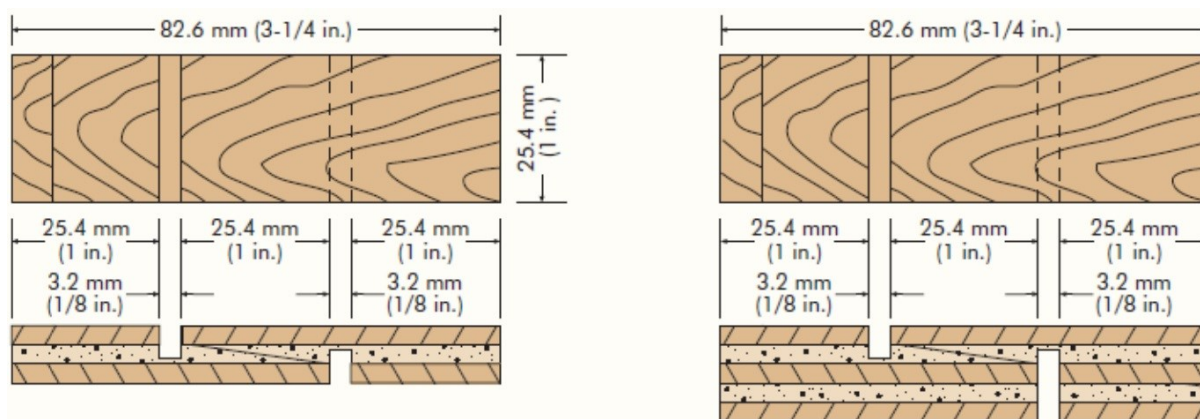


Fonte: Autoria própria (2022).

4.6 Preparação dos corpos de prova

As amostras utilizadas no teste foram cortadas com 82,6 mm de comprimento por 25,4 mm de largura, cortando-as, também, na distância de um terço de cada extremidade, de modo que a área de teste compreendeu 25,4 mm². O corte transversal tem um ângulo de 90° em relação ao comprimento da amostra. Em um dos lados da amostra o corte penetrou pelo painel de compensado até encontrar a segunda lâmina de madeira, já no lado inverso da amostra, o corte feito penetrou duas camadas de lâmina de madeira até encontrar a linha de colagem.

Cada corpo de prova deveria ser semelhante ao demonstrado na Figura 17.

Figura 17 - Molde de um corpo de prova para teste de tração.

Fonte: Adaptado de NIST (2019).

4.7 Teste de vácuo-pressão

O teste de vácuo-pressão seguiu os parâmetros estabelecidos pelo NIST (2019). Os corpos de prova foram primeiro submetidos a uma pressão manométrica negativa de 83,5 kPa à 98,5 kPa por 30 min, seguido da submersão das amostras em água à temperatura ambiente e aplicação de uma pressão manométrica de 450 kPa a 480 kPa por 30 min. É mostrado na Figura 18 o sistema de vácuo-pressão usado.

Figura 18 - Sistema de vácuo-pressão.

Fonte: Autoria própria (2022).

Após esse período, os corpos de prova foram testados enquanto úmidos. Eles foram submetidos a teste de tração até a falha por cisalhamento, com uma velocidade de avanço do atuador da máquina de 600 mm/min.

Após a ruptura por cisalhamento dos corpos de prova, eles foram secos para posterior avaliação do percentual de fibras visuais da linha de colagem na área de ruptura que compreende os 25,4 mm². Essa análise é visual, onde, na área examinada, avaliou-se o percentual de fibras de madeira rompidas pela linha de colagem.

Obteve-se a tensão de rompimento dos corpos de prova através do *software* Tesc Emic. Este é integrado à máquina de tração, este possui uma célula de carga que mensura a tensão exercida.

Para realizar esse teste, foram usados 10 corpos de prova, onde o resultado foi a média dos valores finais das 10 amostras. Nesse teste, não devem ser utilizados corpos de prova contendo quaisquer imperfeições nas lâminas utilizadas na confecção dos painéis.

A máquina de tração utilizada nos testes de cisalhamento é apresentada na Figura 19.

Figura 19 - Máquina de tração.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.8 Teste de ebulição

O teste de ebulição seguiu os parâmetros estabelecidos pelo NIST (2019). Os corpos de prova foram fervidos por 4 h. e depois secados por 20 h na temperatura de 63 °C em estufa com circulação de ar, reduzindo a umidade dos corpos de provas ao máximo de 8 %. As amostras foram fervidas novamente por mais 4 h, resfriadas em água e levadas, ainda molhadas, para teste de cisalhamento na máquina de tração cujo velocidade de avanço do atuador foi de 600 mm/min.

O percentual de falhas nas fibras da madeira foi determinado depois da secagem dos corpos de prova, onde se avaliou a área quadrada de 25,4 mm. A força de rompimento foi obtida através do *software* integrado à máquina de tração.

Para realizar esse teste, foram usados 10 corpos de prova, onde o resultado foi a média dos valores finais das 10 amostras. Nesse teste, também não devem ser utilizados corpos de prova contendo quaisquer imperfeições nas lâminas utilizadas na confecção dos painéis.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises de caracterização de cada uma das resinas. Foram feitas análises de teor de não voláteis, tempo de gel, viscosidade em viscosímetro *Brookfield*, viscosidade em viscosímetro copo Ford com abertura de 8 mm, pH e densidade.

Tabela 1 - Caracterização das resinas.

Resina	Teor de não voláteis (%)	Tempo de gel (seg)	Viscosidade <i>Brookfield</i> (cPs)	Viscosidade Copo Ford (seg)	pH	Densidade (g/cm ³)
A	53,90	425	820	17	12,62	1,235
B	54,27	475	840	17	12,40	1,240
C	54,14	470	880	18	12,53	1,240

Fonte: Autoria própria (2022).

5.2 Testes de cisalhamento

A fim de verificar a eficiência da colagem de cada uma das resinas, foram realizados testes de ruptura por cisalhamento dos corpos de prova em vários cenários. Foram separados 10 corpos de prova (CPs) que passaram pela técnica de vácuo-pressão (V-P) e outros 10 CPs que passaram por ciclo de fervura, buscando replicar a resistência da colagem com o passar do tempo.

Os testes foram divididos por tipo de resina, tempo de montagem e gramatura de resina por metro quadrado, totalizando 36 ensaios, cada qual feito com 10 repetições.

Para verificar se a qualidade da colagem atende os padrões exigidos pelo mercado, utilizou-se como base a norma NBR 12466-2, que descreve os requisitos mínimos que devem ser alcançados nos testes.

Com o propósito de atingir os parâmetros de aprovação, o resultado deve atingir uma relação mínima entre tensão de ruptura e fibras visuais. Essa relação está descrita na Tabela 2.

Tabela 2 - Requisitos de colagem segundo a norma NBR 12466-2.

Tensão de ruptura por cisalhamento (MPa)	Fibras visuais (%)
$0,2 \leq f_v$	Não aplicável
$0,2 \leq f_v < 0,4$	≥ 80
$0,4 \leq f_v < 0,6$	≥ 60
$0,6 \leq f_v < 1,0$	≥ 40
$1,0 \leq f_v$	Sem exigência

Fonte: Adaptado de NBR 12466-2 (2012).

A análise das fibras visuais foi feita seguindo as ilustrações de referência da norma NBR 12466-1, e os valores de tensão de ruptura por cisalhamento foram obtidos através do *software* da máquina de tração.

5.2.1 Resina A

Foi efetuada uma análise de colagem das lâminas de compensado com a resina A, verificando quais cenários apresentaram melhores resultados, posteriormente esses resultados foram compilados em tabelas. Na Tabela 3 estão dispostos os valores do percentual de fibras visuais em cada uma das variações de colagem.

Tabela 3 - Resultados do percentual de fibras visuais na resina A.

Tempo	V-P	V-P	Fervura	Fervura
	160 g/m²	190 g/m²	160 g/m²	190 g/m²
1 hora	73%	98,5%	91,5%	99,5%
4 horas	83%	95%	93%	97%
8 horas	68%	78%	71,5%	87%

Fonte: Autoria própria (2022).

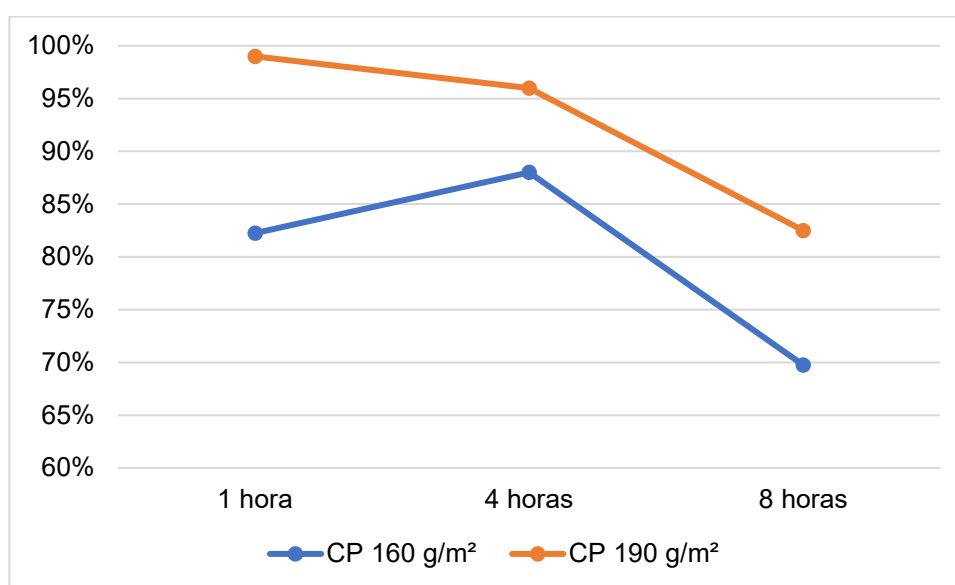
Além do verificar o percentual de fibras visuais, também foram reunidos os valores para tensão de ruptura. A Tabela 4 dispõe os valores encontrados para a resina A.

Tabela 4 - Resultados da tensão ruptura na resina A.

Tempo	V-P	V-P	Fervura	Fervura
	160 g/m ²	190 g/m ²	160 g/m ²	190 g/m ²
1 hora	1,01 MPa	0,93 MPa	0,84 MPa	1,04 MPa
4 horas	1,20 MPa	1,19 MPa	1,29 MPa	1,16 MPa
8 horas	0,82 MPa	1,09 MPa	0,82 MPa	1,06 MPa

Fonte: Autoria própria (2022).

A interpretação dos resultados e verificação do comportamento da colagem com a variação dos parâmetros da Tabela 3 foram dispostos no Gráfico 1. Nele, os percentuais para as fibras visuais são a média dos valores entre os testes de vácuo-pressão e fervura, assim, podendo avaliar a influência do tempo de assemblagem e gramatura de resina no desempenho da colagem.

Gráfico 1 - Percentual de fibras visuais da resina A.

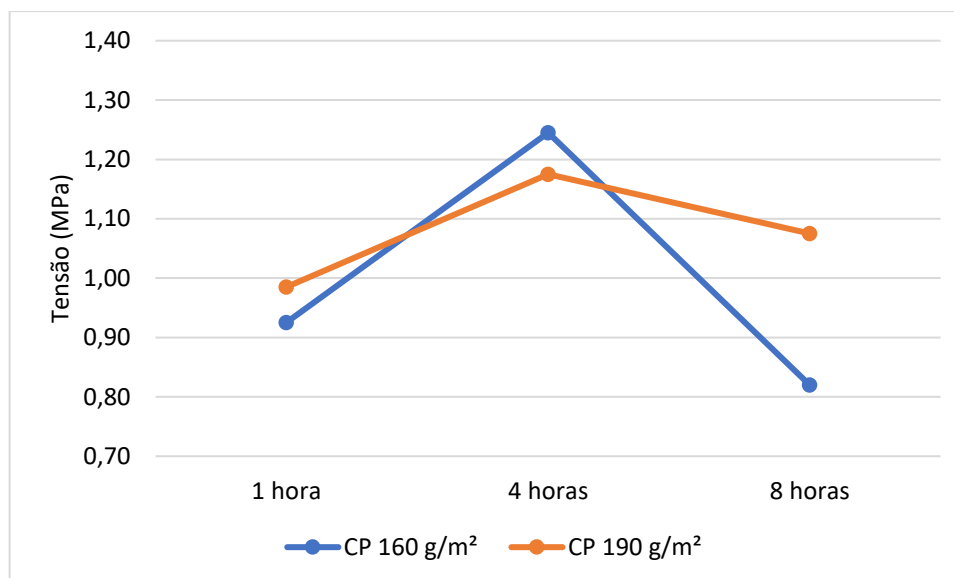
Fonte: Autoria própria (2022).

Como é visível no gráfico acima, essa resina tende a perder desempenho no percentual de fibras visuais com maiores tempos de assemblagem. Ela tem uma boa performance com uma assemblagem de até 4 h, porém acima disso ocorre a perda de desempenho no desfibramento do compensado, independentemente da gramatura de resina utilizada.

Usando os mesmos critérios do teste de fibras visuais, os valores encontrados para a tensão de ruptura dispostos na Tabela 4 também estão inclusos em um gráfico.

Seguindo o mesmo padrão do gráfico acima, os valores encontrados são a média entre os resultados dos testes de vácuo-pressão e fervura (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Tensão de ruptura da resina A.



Fonte: Autoria própria (2022).

Diferente do teste de fibras visuais, a tensão de ruptura aumentou com um período de montagem intermediário. Na gramatura de 160 g/m², esse aumento foi de 34,6 %, já na gramatura de 190 g/m², houve um aumento de 19,3 %, perdendo desempenho depois disso. O que justifica essa ocorrência é que com um tempo maior de montagem, ocorre uma maior impregnação da resina nas fibras de madeira, necessitando uma tensão maior para o rompimento da linha de cola.

Isso é dito por Marra (1992), que fala que a impregnação do adesivo influencia as propriedades mecânicas do compensado, pois a penetração propicia a ancoragem do adesivo nas fibras da madeira, necessitando de tensões maiores para que haja a ruptura da linha de colagem.

Porém, se o tempo de montagem se tornar muito longo, a resina impregna excessivamente antes da prensagem a quente, comprometendo o desempenho, e tal tendência pode ser vista no tempo de montagem de 8 h.

5.2.2 Resina B

Os mesmos testes realizados para a resina A foram repetidos sob as mesmas condições para a resina B. Na Tabela 5 estão dispostos os resultados obtidos de fibras visuais com variações de tempo de assemblagem e gramatura de adesivo por metro quadrado de lâmina.

Tabela 5 - Resultados do percentual de fibras visuais na resina B.

Tempo	V-P	V-P	Fervura	Fervura
	160 g/m ²	190 g/m ²	160 g/m ²	190 g/m ²
1 hora	50,5%	83,5%	81%	90%
4 horas	88%	98,5%	85,5%	99,5%
8 horas	56%	98,5%	81,5%	98,5%

Fonte: Autoria própria (2022).

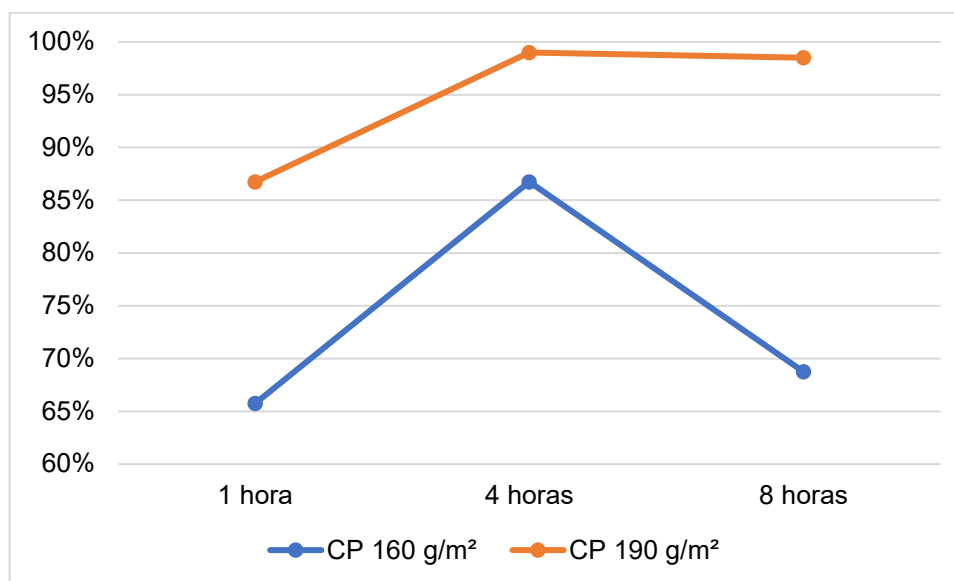
Assim como os resultados das fibras visuais, os valores obtidos para tensão de ruptura também foram compilados, estando dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados da tensão de ruptura na resina B.

Tempo	V-P	V-P	Fervura	Fervura
	160 g/m ²	190 g/m ²	160 g/m ²	190 g/m ²
1 hora	0,99 MPa	0,86 MPa	1,08 MPa	1,02 MPa
4 horas	0,88 MPa	1,18 MPa	0,76 MPa	1,22 MPa
8 horas	0,91 MPa	1,15 MPa	0,91 MPa	1,04 MPa

Fonte: Autoria própria (2022).

Os resultados de fibras visuais estão dispostos no Gráfico 3, possibilitando uma melhor visualização dos resultados.

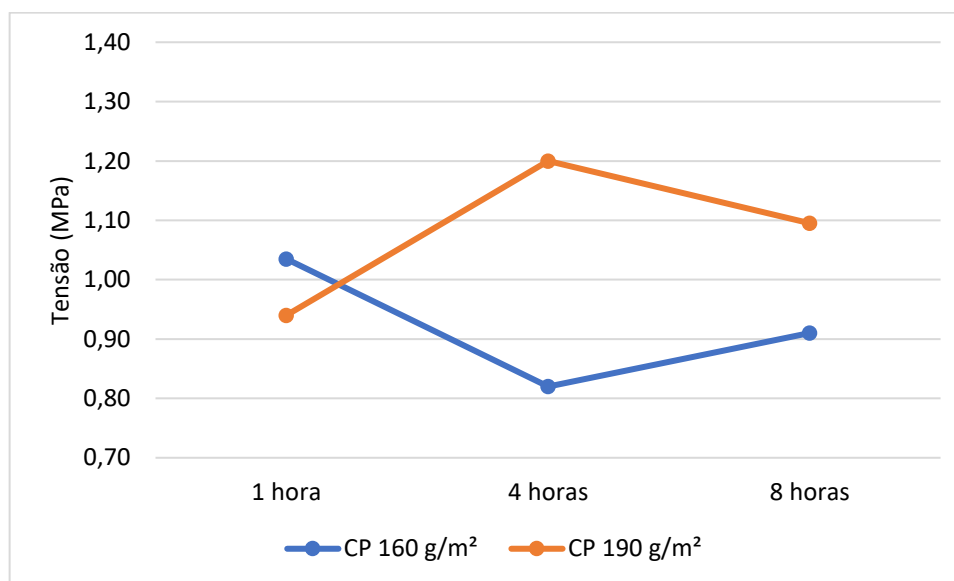
Gráfico 3 - Percentual de fibras visuais da resina B.

Fonte: Autoria própria (2022).

Como se pode observar no gráfico acima, a utilização de gramatura maior de adesivo na colagem dos painéis gerou uma diferença acentuada no percentual de fibras visuais, além de manter a qualidade da colagem em tempos de assemblagem maiores.

Apesar dessa diferença acentuada no desempenho usando uma gramatura maior de adesivo, Silva *et al.* (2006) ressaltam que o adesivo representa grande despesa no processo produtivo, por isso deve haver um balanceamento entre a quantidade de adesivo utilizada e custo dele no produto.

Para uma interpretação mais concisa dos resultados, os valores para tensão máxima de ruptura estão dispostos no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Tensão de ruptura da resina B.

Fonte: Autoria própria (2022).

A gramatura de resina utilizada também teve grande influência na tensão de ruptura da resina B. Em tempos curtos de montagem essa diferença é diminuta, já em tempos intermediários e longos fica perceptível a melhora do desempenho da colagem com maior gramatura do adesivo.

O processo de impregnação do adesivo nas fibras requer tempo, isso fica evidenciado com a melhora dos resultados com 4 h de montagem. Da mesma forma, se a quantidade de adesivo utilizado não for suficiente, ele acaba penetrando demasiadamente nas fibras, não restando material suficiente na camada superficial da lâmina, impedindo uma colagem adequada.

O resultado da colagem em relação à utilização de uma gramatura menor foi descrito por Kamke (2007). De acordo com o autor, ocorre a penetração do adesivo na lâmina devido a porosidade da madeira. Essa penetração é maior em lâminas de madeira com baixa densidade (como ocorre com o *pinus*), onde a penetração é acentuada com o passar do tempo. Dessa forma, tempos maiores de montagem podem fazer com que haja falta de adesivo na linha de colagem no momento da prensagem.

5.2.3 Resina C

A resina C também teve seus resultados reunidos. A Tabela 7 apresenta os valores obtidos para fibras visuais.

Tabela 7 - Resultados do percentual de fibras visuais na resina C.

Tempo	V-P	V-P	Fervura	Fervura
	160 g/m ²	190 g/m ²	160 g/m ²	190 g/m ²
1 hora	81%	91,5%	93,5%	99,5%
4 horas	84,5%	97,5%	97,5%	100%
8 horas	73,5%	90%	87%	98,5%

Fonte: Autoria própria (2022).

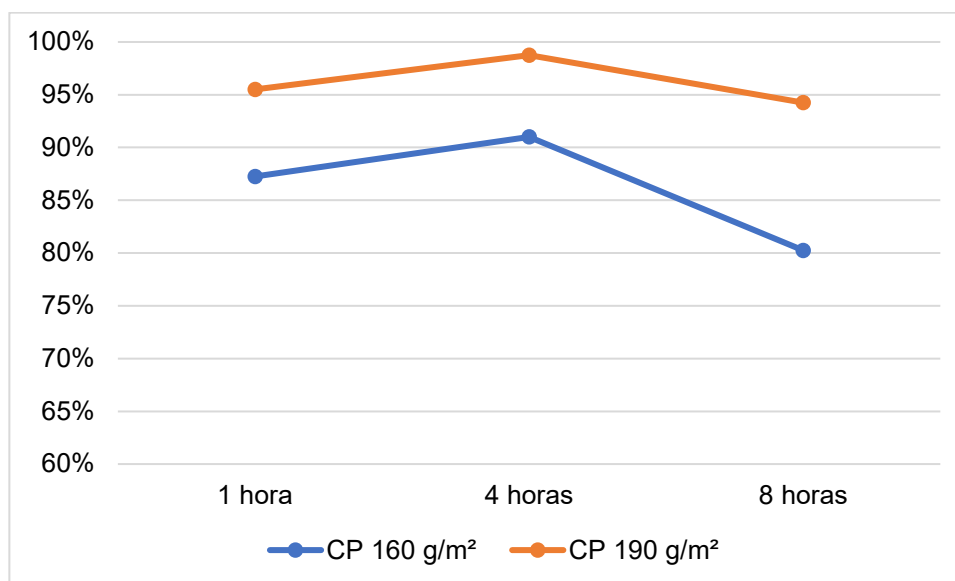
A Tabela 8 contém os resultados para a tensão de ruptura da resina C, seguindo as mesmas variáveis utilizadas para as outras resinas.

Tabela 8 - Resultados da tensão máxima de ruptura na resina C.

Tempo	V-P	V-P	Fervura	Fervura
	160 g/m ²	190 g/m ²	160 g/m ²	190 g/m ²
1 hora	0,94 MPa	0,98 MPa	1,17 MPa	0,94 MPa
4 horas	1,06 MPa	0,95 MPa	1,01 MPa	1,02 MPa
8 horas	0,99 MPa	1,43 MPa	1,12 MPa	1,34 MPa

Fonte: Autoria própria (2022).

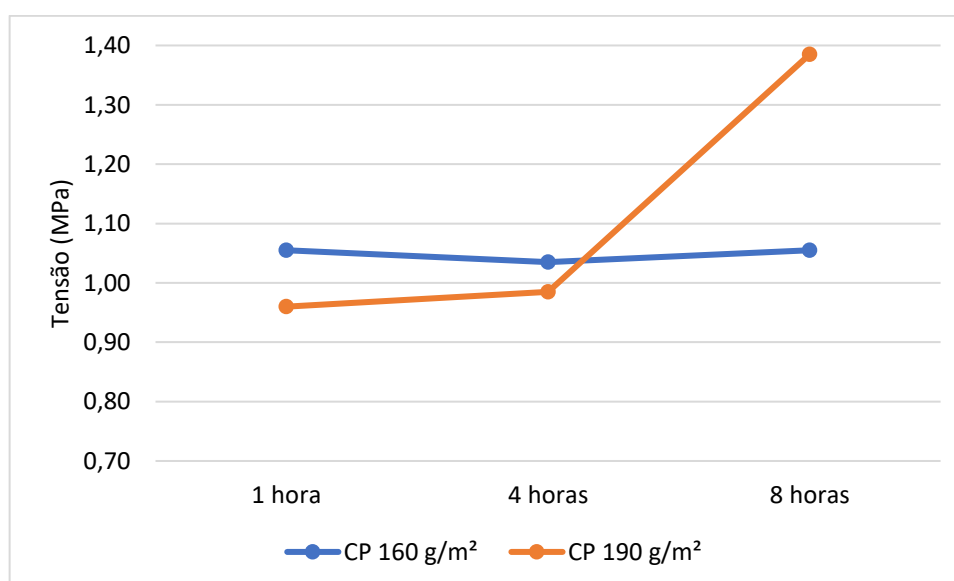
Os resultados da Tabela 7 foram colocados no Gráfico 5, o qual mostra a variação de fibras visuais da resina C em diversas circunstâncias.

Gráfico 5 - Percentual de fibras visuais da resina C.

Fonte: Autoria própria (2022).

A resina C apresentou um padrão de fibras visuais para ambas as gramaturas de resina, mantendo uma baixa variabilidade mesmo após um longo tempo de assemblagem. Essa característica é um diferencial, tornando essa resina adequada para diferentes esquemas de produção.

Os resultados da Tabela 8 foram colocados no Gráfico 6, o qual mostra a variação de desfibramento da resina C em diversas circunstâncias.

Gráfico 6 - Tensão de ruptura da resina C.

Fonte: Autoria própria (2022).

Os valores para a tensão de ruptura mantiveram bons resultados, mesmo em maiores tempos de assemblagem, seguindo o mesmo padrão dos resultados de fibras visuais. Essa característica, para ambos os testes, ratifica que essa resina apresenta grande estabilidade de resultados apesar das variações propostas.

Kollmann *et al.* (1975) relatam que a espessura da linha de cola, no momento da prensagem, influencia diretamente no resultado de resistência do compensado. Também cita que deve haver um balanceamento entre quantidade de cola impregnada nas fibras da madeira e cola na linha de colagem, sendo que isso varia dependendo do tempo entre a aplicação do adesivo e a prensagem.

Isso leva a concluir que a resina C conseguiu manter esse equilíbrio em diferentes tempos mais eficientemente que as outras duas resinas. Dessa forma, destacando-se os resultados mais equilibrados independentemente das variáveis utilizadas.

5.3 Avaliação comparativa entre as resinas

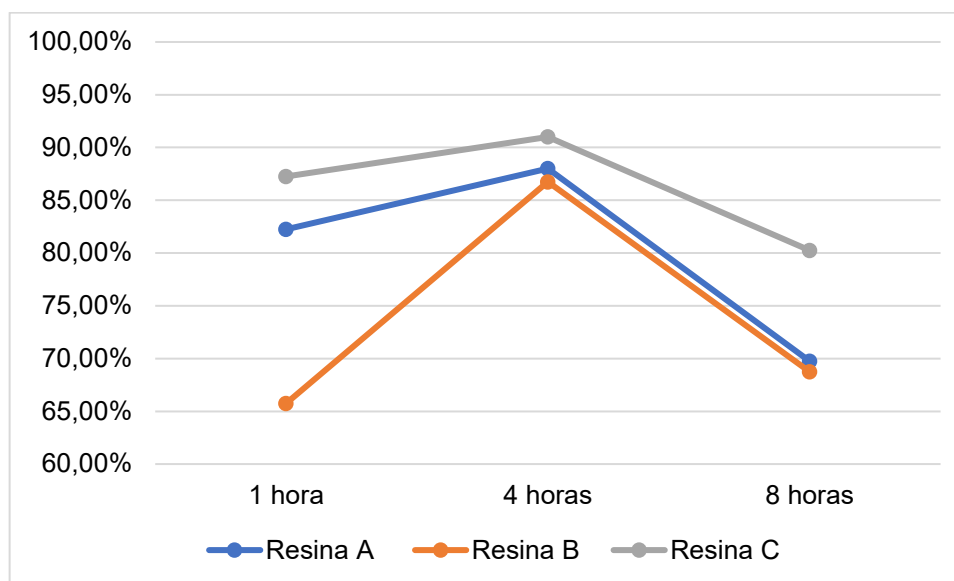
5.3.1 Gramatura de 160 g/m²

Após avaliar a variação de desempenho da colagem de cada uma das resinas individualmente com diversas variações de parâmetros, é necessário fazer uma avaliação comparativa entre as resinas.

Comparando o desempenho das resinas, podemos avaliar qual resina é mais indicada para cada processo específico. Juntando isso com as suas características físico-químicas, se possibilita-se observar o desempenho de colagem.

A avaliação comparativa considerou a média dos resultados dos testes de fervura e vácuo-pressão sob cada condição de análise, gerando resultados mais concisos e de fácil interpretação.

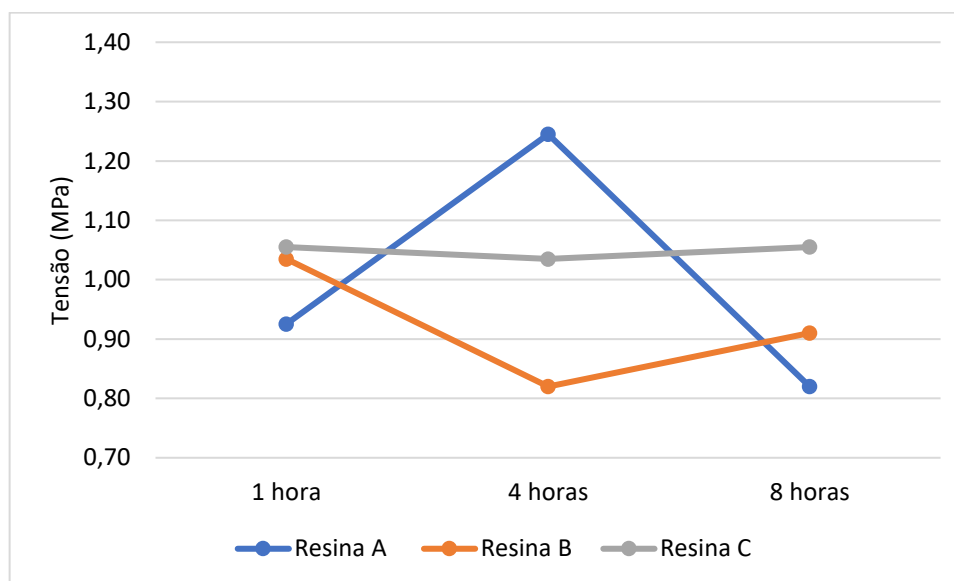
No Gráfico 7 estão expostos os resultados médios da colagem das lâminas com 160 g/m² de adesivo para a avaliação de fibras visuais.

Gráfico 7 - Percentual de fibras visuais das resinas na gramatura de 160 g/m².

Fonte: Autoria própria (2022).

Observando o gráfico, é nítida a melhora nas fibras visuais com 4 horas de assemblagem, subindo de 82,25 % para 88 % na resina A, de 65,75 % para 86,75 % na resina B, e de 87,25 % para 91 % na resina C, porém, esse percentual diminui em todas as resinas no tempo de 8 h. Na resina A diminuiu de 88 % para 69,75 %, a resina B caiu de 86,75 % para 68,75 %, e a resina C diminuiu de 91 % para 80,25 %. Destaca-se a resina C como a que teve, além de um melhor desempenho, uma menor variabilidade com o tempo.

Da mesma forma que foram avaliadas as fibras visuais, também foi realizada a comparação de tensão de ruptura entre as resinas utilizando a gramatura de 160 g/m² e esses resultados estão dispostos no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Resultados da tensão de ruptura na gramatura de 160 g/m².

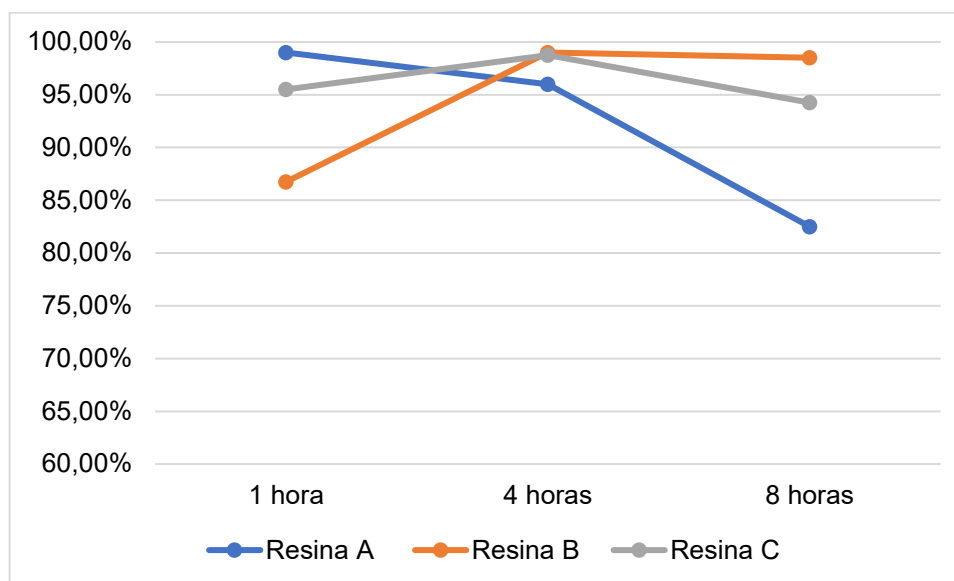
Fonte: Autoria própria (2022).

Como ocorreu para os resultados de fibras visuais, os resultados encontrados para tensão de ruptura também têm menor variabilidade na resina C. Observando esses resultados, vê-se um comportamento diferente na resina A, onde ela sobe de 0,93 MPa em 1 h de montagem para 1,25 MPa em 4 h de montagem, posteriormente caindo para 0,82 MPa em 8 h de montagem. Já a resina B e C não tem essa queda abrupta de desempenho em 8 h de montagem. A resina B varia de 1,04 MPa em 1 h, para 0,82 MPa em 4 h e sobe para 0,91 MPa em 8 h. E a resina C cai de 1,06 MPa em 1 h, para 1,04 MPa em 4 h, subindo novamente para 1,06 MPa em 8 h.

Isso consolida a resina C como a melhor para ser utilizada em processos industriais pela menor variação nas condições de colagem, e estabilidade dos resultados com diferentes tempos de montagem.

5.3.2 Gramatura de 190 g/m²

Fazendo a mesma avaliação comparativa entre as resinas, desta vez utilizando a gramatura de colagem de 190 g/m², obteve-se resultados sob uma perspectiva diferente, na qual se utiliza uma quantidade maior de adesivo, esperando resultados melhores. Os resultados para fibras visuais estão no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Percentual de fibras visuais das resinas na gramatura de 190 g/m².

Fonte: Autoria própria (2022).

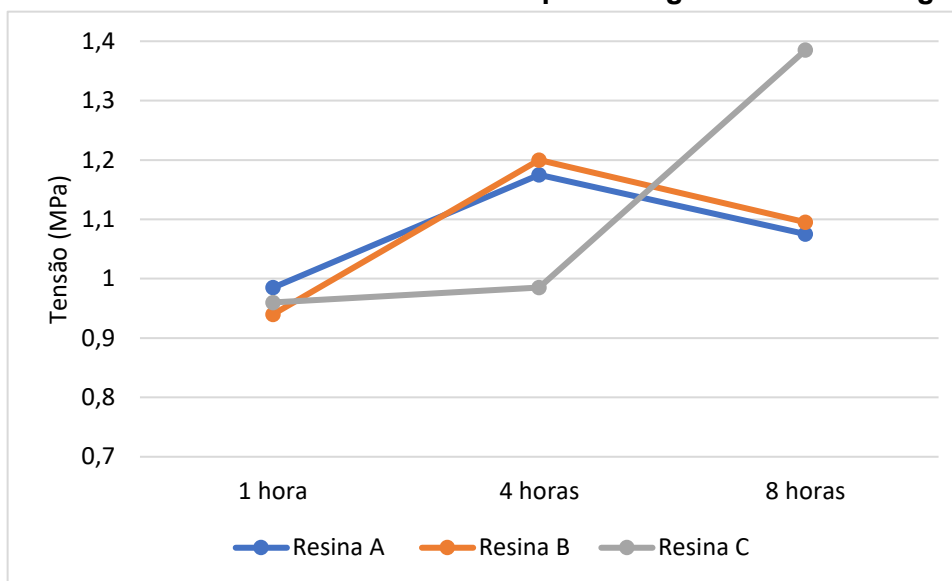
Como é visto no gráfico acima, houve uma melhora significativa no percentual de fibras visuais de todas as resinas em relação a gramatura de adesivo menor. Além desse fator, ficou nítida uma diferença circunstancial entre a resina A, e as resinas B e C, onde a resina A acaba tendo uma perda de desempenho com o passar do tempo, ao contrário das outras duas resinas que melhoram seus percentuais de fibras visuais.

Essa é uma análise interessante, pois dependendo do processo em que serão utilizadas, pode-se fazer esse ajuste de gramatura para se obter uma colagem satisfatória mesmo em processos com grandes tempos de assemblagem.

Em relação aos resultados de fibras visuais, pode-se fazer uma comparação com os resultados obtidos por Almeida (2011), que também realizou seus testes usando lâminas de *Pinus elliotti*, cujo teste obteve um percentual médio de 60 % de fibras visuais. Este estudo acabou apresentando resultados melhores em todas as variações de colagem utilizadas, variando entre 66 % e 99 % de fibras visuais.

A análise para tensão de ruptura também foi feita usando a gramatura maior de resina. Os resultados estão no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Resultados da tensão de ruptura na gramatura de 190 g/m².



Fonte: Autoria própria (2022).

Analisando os resultados do gráfico, ficou evidente a melhora nos valores obtidos em relação à utilização de uma gramatura de adesivo menor. Além desse fator, pode ser observado a melhora dos resultados com 4 h de assemblagem.

Após esse período, a resina C mostra um comportamento diferente das outras duas resinas. Ela tem um ganho nos valores de tensão de ruptura, enquanto as outras perdem desempenho. Essa diferença consagra a resina C como tendo um desempenho de colagem melhor que as outras resinas.

De modo geral, os resultados para tensão de ruptura convergem com os resultados obtidos por Prata (2006). Em seu estudo para avaliação da colagem de painéis comerciais de *pinus*, ele analisou 12 diferentes painéis, tendo resultados médios para tensão de ruptura após ciclo de fervura entre 0,78 MPa e 1,33 MPa.

Pode-se também fazer um comparativo com os valores encontrados por Iwakiri *et al.* (2009), que encontraram valores médios de tensão de ruptura para diferentes espécies de *pinus*, entre 0,88 MPa e 1,42 Mpa. Esses resultados também afluem com os do presente estudo, que encontrou valores médios para tensão de ruptura entre 0,82 MPa e 1,39 MPa.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes realizados para avaliação das resinas foram executados em ambiente controlado, evitando a influência de fatores externos. Em processos industriais, esse controle geralmente não tem tamanha eficácia. Assim, se esses testes fossem replicados, possivelmente, não teríamos uma repetição dos resultados.

Avaliando o desempenho das resinas, observou-se que as 3 obtiveram resultados satisfatórios, atendendo as exigências da norma NBR 12466-2 para um painel de madeira compensada. Mesmo com as 3 resinas atingindo bons resultados, foram observadas diferenças entre cada uma delas.

A resina A apresentou resultados melhores com tempos de assemblagem de até 4 h, sendo verificado que no tempo de 8 h a média de fibras visuais caiu 15,88 %, e o resultado médio da tensão de ruptura ficou 0,26 MPa menor. Além do tempo de assemblagem, a gramatura de adesivo usado na colagem também teve grande influência nos resultados.

Na presença de uma gramatura de adesivo maior, a influência do tempo de assemblagem foi minimizada. Após 8 h de assemblagem, usando a gramatura de 190 g/m², encontrou-se o percentual médio 82,50 % de fibras visuais, enquanto para a gramatura de 160 g/m² esse valor foi de 69,75 %. Já para tensão de ruptura, na gramatura de 190 g/m², o resultado médio foi de 1,08 MPa, enquanto usando 160 g/m², obteve-se a tensão de ruptura média de 0,82 MPa.

Observando esses resultados, pode-se concluir que maiores tempos de assemblagem exigem a aplicação de uma quantidade maior de resina, a fim de que a qualidade da colagem não seja comprometida.

A resina B teve um comportamento similar à resina A, destacando-se como principal diferença a estabilidade de colagem em maiores tempos de assemblagem usando a gramatura de adesivo de 190 g/m².

Observa-se uma melhora acentuada na quantidade de fibras visuais no tempo de assemblagem de 4 h, saindo de 66 % para 87 % na gramatura de 160 g/m², e de 86,75 % para 99 % na gramatura de 190 g/m². Porém, recaiu-se no mesmo problema evidenciado pela primeira resina, sendo que na gramatura de 160 g/m², perde-se desempenho a partir desse tempo, o teor médio de fibras visuais caindo de 87 % para 69 %, enquanto na gramatura de 190 g/m² há maior estabilidade, variando de 99 % para 98,5 %.

Já nos resultados de tensão de ruptura, não se pode observar, com tanta clareza, a mesma tendência que ocorre nas fibras visuais. O que pode ser extraído é que, usando uma gramatura de 160 g/m², houve uma queda no desempenho com o passar do tempo, saindo de uma tensão média de ruptura de 1,04 MPa com 1 h de assemblagem, para uma tensão média de ruptura de 0,91 MPa com 8 h de assemblagem. Já na gramatura de 190 g/m², o comportamento foi inverso, saindo de uma tensão média de ruptura de 0,94 MPa no tempo de 1 h, para um resultado de 1,10 MPa com 8 h de assemblagem.

Esses resultados, mais uma vez, evidenciam a relação de tempo de assemblagem com a gramatura utilizada, onde tempos maiores requerem maiores quantidades de adesivo na linha de colagem.

A resina C teve um comportamento de colagem mais homogêneo, obtendo bons resultados nos 3 tempos de assemblagem, mostrando ter uma variabilidade de resultados menor que as outras duas resinas.

Essa estabilidade maior ficou evidente pelos resultados obtidos tanto para fibras visuais, quanto para tensão de ruptura. Para fibras visuais, usando a gramatura de 160 g/m², o valor médio de fibras visuais saiu de 87 % com 1 h de assemblagem, passando a 91 % em 4 h de assemblagem, caindo para 80 % em 8 h de assemblagem. O que demonstra uma variação menor dos resultados em relação as outras resinas.

Usando a gramatura de 190 g/m², houve grande estabilidade nos resultados, saindo de um valor médio de 95,5 % de fibras visuais com 1 h de assemblagem para um valor de 98,75 % em 4 h de assemblagem, e 94,25 % com 8 h de assemblagem.

Os resultados de tensão de ruptura médio da resina C também se destacaram em relação às outras resinas, pois da mesma forma que as fibras visuais, eles tiveram maior estabilidade com o passar do tempo, mesmo com uma gramatura de adesivo menor.

Usando a gramatura de 160 g/m², a tensão média de ruptura saiu de 0,96 MPa para surpreendentes 1,39 MPa com 8 h de assemblagem. Como esse resultado dependeu-se dos outros, seria de grande valia um novo teste para confirmar esses valores, visto que eles não seguiram a tendência para essa resina.

Já para a gramatura de 190 g/m², os resultados foram muito próximos, independentemente do tempo de assemblagem analisado. Saindo de uma tensão média de ruptura de 1,06 MPa com 1 h de assemblagem, passando a uma tensão

média de ruptura de 1,04 MPa em 4 h de montagem, e tendo o valor de 1,06 MPa com 8 h de montagem.

De modo geral, a resina C teve um resultado destacado frente às outras, pela sua estabilidade em diferentes gramaturas e tempos de montagem, sendo a mais indicada para o processo de produção de painéis de compensado por suportar maiores variações. Essa estabilidade facilita a produção de painéis que atendam as normas vigentes que regem o setor.

Este estudo pode ser repetido utilizando outras variações de gramatura de colagem, além de testes com tempo de montagem mais longos, baseados em uma análise fatorial. Isso refinará os dados obtidos, possibilitando a chancela dos resultados desse estudo, além de maior conhecimento sobre a performance de cada resina e suas peculiaridades.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, N.F. **Avaliação da qualidade da madeira de um híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de lâminas e manufatura de compensados.** (2011) Dissertação (Mestrado) - Programa: Recursos Florestais, USP, Piracicaba, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12466-1:** Madeira compensada – Qualidade de colagem Parte 1: Métodos de ensaio. ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12466-2:** Madeira compensada – Qualidade de colagem Parte 2: Requisitos. ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Estudo setorial 2019.** Disponível em: <https://abimci.com.br/wp-content/uploads/2021/08/Estudo-_Setorial-_Abimci-_2019_versao_portugues.pdf>. Acesso em: 10 set. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FORMOL E DERIVADOS (ABRAF). **Capacidade instalada.** Disponível em: <<https://www.abraf.org.br/capacidadeinstalada.php>>. Acesso em: 15 set. 2022.
- CRESPY, D.; BOZONNET, M.; MEIER, M. 100 Years of Bakelite, the material of a 1000 uses. **Angewandte Chemie Internacional**, Weinheim, v. 47, p. 3322-3328, 2008.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Global forest resources assessment 2015.** FAO, 2015. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/i4808e/i4808e.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2022.
- GARDZIELLA, A.; PILATO, L.A.; KNOP, A. **Phenolic Resins Chemistry, Applications, Standardization, Safety and Ecology.** New York: Springer, 2000.
- IBEH C.C.; PIZZI A.; **Phenol-formaldehyde resins.** In: DODIUK, H.; GOODMAN, S.H. Handbook of thermoset plastics. Elsevier, 2022.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório anual IBÁ 2021.** IBÁ, 2021. Disponível em: <<https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>>. Acesso em: 29 set. 2022.
- IWAKIRI, S.; MATOS, J.L.M. de; LIMA, A.J.M. de; FERREIRA, E.S.; BATISTA, D.C.; ROMÃO, S.A.A. Produção de painéis compensados de *Pinus* tropicais colados com resina fenol-formaldeído. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 3, 669-673, 2009.
- JAWAID, M.; ASIM, M. **Phenolic polymers based composite materials.** Singapura: Springer, 2021.

KAMKE F.A.; Adhesive penetration in wood - a review. **Wood and Fiber Science**, Oregon, v. 39, n. 2, 205-220, 2007.

KOLLMAN F. F. P.; KUENZI E. W.; STAMM A. J. **Principles of wood Science and technology**. New York, Springer-Verlag, 1975.

LIMA, V.S.; NASCIMENTO, S.L.; SANTOS, M.C.; DIAS, J.M.S.; NASCIMENTO, B.L.M. Avaliação geográfica e econômica das indústrias de compensado no Brasil. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 8, n. 4, 2022.

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

NEMOTO, T.; AMIR, I.; KONISHI, G. Synthesis and properties of a high-molecular-weight organosoluble bisphenol a novolac. **Polymer Journal**, Tóquio, v. 41, n. 4, 338–342, 2009.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **Voluntary Product Standard PS 1-19 Structural Plywood**. NIST, 2019. Disponível em: <<https://www.nist.gov/system/files/documents/2021/04/08/PS%201%2019%20final%20WERB-approved%20%28NIST%20vers%2011-18-2019%29%2B.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2022.

OTHMER, K. **Encyclopedia of Chemical Technology**. New Jersey: Wiley-Interscience, 2007.

PARAMESWARAN, P.S. **Modification of Phenol Formaldehyde Resin for Improved Mechanical Properties**. 2009. Tese (Doutorado) - Department of polymer science and rubber technology, Cochin university of science and technology, Kochi, 2009.

PILATO L. **Phenolic Resins: A Century of Progress**. Berlin: Springer, 2010.

PIZZI, A. **Advanced Wood Adhesives Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., 1994.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of Adhesive Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., 2003.

PRATA, J.G. **Desempenho de um sistema de qualidade em uma fábrica de painéis compensados**. 2006. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

PUZARI, A. **Novolac resin: Novel functional materials**. Guwahati: Nova Science Publishers, 2010.

SANQUETTA, C.R.; SANTANA, G.M.; SANQUETTA, M.N.I.; OLIVEIRA, T.W.G.; CORTE, A.P.D. Produção, importação, exportação e consumo aparente de painéis de madeira no brasil entre 1961 e 2016. **Biofix Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 44-49, 2020.

SELLERS JR, T.; **Plywood and adhesive technology**. New York: Marcel Dekker Inc., 1985.

SILVA, G.A.; MENDES, L.M.; TRUGILHO, P.F.; SANTOS, I.F.; PADUA, F.A. Efeito de algumas variáveis de processamento nas propriedades físicas de painéis de madeira de partículas alongadas. **Ciência Florestal**, v.16, n.1, p.51-60, 2006.

SRIVASTAVA, K.; KUMAR, C.; SRIVASTAVA, D.; TRIPATHI, S.K. Synthesis and characterization of resoles and their blends with epoxy resin: a review. **Macromolecules An Indian Journal**, Kanpur, v. 3, n. 4, p. 176-200, nov. 2007.

VIEIRA, M.C.; BRITO, E.O.; GONÇALVES, F.G. Evolução Econômica do Painel Compensado no Brasil e no Mundo. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 227-285, 2012.

WALE, A.; MULANI, K.; DONDE, K.; PONRATHNAM, S.; CHAVAN, N. *In Situ* Generation of Ammonia: na eficiente catalyst for the synthesis of phenol-anilyne-formaldehyde resol resins. **Advanced Journal of Chemistry**, Section A, v.3, n.2 146-158, 2020.

WOOD BASES PANELS INTERNATIONAL (WBPI). **Global plywood industry update**. WBPI, 2018. Disponível em: <<https://www.wbpionline.com/features/global-plywood-industry-update-6908934/>>. Acesso em: 10 out. 2022.

WILK, C. **Plywood: A Material Story**. Londres: Victoria and Albert Museum/Thames & Hudson, 2017.

ZAKOSHANSKY, V.M. The Cumene Process for Phenol–Acetone Production. **Petroleum Chemistry, Doncaster Ct.**, Long Grove, v. 47, n. 4, p. 273–284, 2007.