

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL**

LUANA WILCZAK

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ADESIVO
POLIURETANO DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA UTILIZADO NA
PRODUÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2014**

LUANA WILCZAK

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ADESIVO
POLIURETANO DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA UTILIZADO NA
PRODUÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia de Produção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Curitiba, sede Ecoville, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Produção Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Elaine Azevedo

Co-orientadora: Prof^a. Dra. Rosilani Trianoski

CURITIBA
2014



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Campus Curitiba – Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Curso de Engenharia de Produção Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO ADESIVO POLIURETANO DERIVADO DE ÓLEO DE MAMONA UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS COMPENSADOS

Por

LUANA WILCZAK

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 12 de março de 2014, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – Elaine Azevedo, Dra.
UTFPR

Prof. Co-Orientador - Rosilani Trianoski, Dra.
UFPR

Prof. Elisabeth Penner, Dra.
UTFPR

UTFPR - Deputado Heitor de Alencar Furtado, 4900 - Curitiba - PR Brasil
www.utfpr.edu.br dacoc-ct@utfpr.edu.br telefone DACOC: (041) 3373-0623

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar força e coragem para superar as dificuldades e por estar presente em todos os momentos da minha vida.

Agradeço a todas as pessoas que fizeram parte dessa fase importante da minha vida e que não serão mencionadas nos parágrafos seguintes.

À Prof^a. Dra. Elaine Azevedo e Prof^a Dra. Rosilani Trianoski pela orientação deste trabalho e por todo apoio e disponibilidade.

Ao Prof. MsC. Mauro Edson Alberti pelo apoio incondicional sempre quando foi necessário.

Ao grupo de Química Analítica e de Tecnologia de Polímeros do Instituto de Química de São Carlos - USP, em especial ao Dr. Salvador Claro Neto, pelo fornecimento do poliuretano.

Ao Laboratório de Painéis de Madeira da UFPR, pelo apoio e disponibilização do espaço.

Aos funcionários Sr. Ademir José Cavali e Sr. Vítor Herrera, pela confecção dos corpos de prova, que foi de fundamental importância para a obtenção dos resultados.

À Gisele Brochini por todo auxílio durante a confecção dos painéis e realização dos ensaios mecânicos.

À técnica de laboratório Mariuci Torres dos Santos pelo auxílio prestado nas mais diversas ocasiões.

Ao grupo de materiais do DAMEC da UTFPR pela disponibilização do espaço para estudo e aos alunos e estagiários do Laboratório de Polímeros e Compósitos da UTFPR.

Agradeço a toda a comunidade da Universidade Federal do Paraná e da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio incondicional.

Agradeço à UTFPR pelo apoio financeiro ao trabalho de conclusão de curso.

Gostaria de registrar aqui minha gratidão à minha família que sempre me incentivou e me ajudou a enfrentar esse desafio.

À Fundação Araucária, FAPESP, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro aos laboratórios envolvidos que colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores que fazem parte da banca, agradeço-lhes imensamente pela disponibilidade, atenção e dedicação.

RESUMO

WILCZAK, Luana. Avaliação do comportamento mecânico do adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado na produção de painéis compensados. 2014. 61f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Produção Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Os adesivos comerciais comumente utilizados para a produção de painéis compensados contêm resinas à base de formaldeído, que é uma substância cancerígena. O adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona é uma alternativa para substituir esses adesivos, pois é fabricado com matéria-prima de origem natural, não libera substâncias nocivas à saúde ou ao meio ambiente, por não possuir solventes em sua composição, e sua produção é viável comercialmente. Painéis compensados foram fabricados com o adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona a 180 g/m², 160 g/m², 140 g/m² e 120 g/m², e com os adesivos uréia-formaldeído e fenol-formaldeído a 180 g/m². Em seguida, foram cortados corpos de prova e realizados os ensaios de flexão estática e cisalhamento por tração da linha de cola. Os resultados mostraram que para os dois ensaios não houve redução de resistência dos painéis fabricados com o adesivo de poliuretano em relação aos produzidos com os adesivos contendo resinas à base de formaldeído nas condições normais de temperatura e umidade. Condições críticas de umidade e temperatura podem causar diminuição da resistência dos painéis produzidos com o adesivo de poliuretano. Isto indica que o adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona pode substituir os adesivos comerciais comumente empregados na indústria quando utilizados em painéis compensados destinados ao uso interno.

Palavras-chave: Painéis compensados. Óleo de mamona. Fenol-formaldeído. Uréia-formaldeído.

ABSTRACT

WILCZAK, Luana. Mechanical behavior evaluation of polyurethane adhesive derived from castor oil used in plywood production. 2014. 61f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Produção Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Commercial adhesives commonly used in plywood panels' production contain resins having formaldehyde in its composition, which is a carcinogen. The castor-oil based polyurethane adhesive is an alternative to replace those adhesives, because its origin is a natural raw material, does not release harmful substances to health or the environment, due to its solvent free composition, and can be commercially produced. Plywood panels were produced with castor-oil based polyurethane adhesive using 180 g/m², 160 g/m², 140 g/m² and 120 g/m², with urea-formaldehyde and phenol-formaldehyde based adhesive using 180 g/m². Specimens were cut and the bending and shear glue line tests were done. The results showed no strength reduction of the boards produced with the polyurethane adhesive for both tests in normal conditions of humidity and temperature. Critical conditions of humidity and temperature can cause a strength reduction on those boards. It means that castor-oil based polyurethane adhesive can replace commercial adhesives for internal use plywood panels.

Keywords: Plywood panels. Castor oil. Fenol-formaldehyde. Urea-formaldehyde.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A, forma genérica de uma conífera. B, forma genérica de uma folhosa. C, seção transversal de <i>Pseudotsuga mensiezii</i> , uma típica conífera. D, seção transversal de <i>Betula allegheniensis</i> , uma típica folhosa. Escala 780 µm.	13
Figura 2 - Estrutura macroscópica da madeira.....	14
Figura 3 - Composição química da celulose e da hemicelulose.....	15
Figura 4 - Ações de molhar (a) e espalhar (b) de um adesivo.....	20
Figura 5 - Estruturas químicas de MDI.....	26
Figura 6 - A estrutura do triglicerídeo de ácido ricinoléico.....	27
Figura 7 - Fluxograma geral de atividades	28
Figura 8 - Secagem de lâminas.....	29
Figura 9 - Materiais utilizados para a mistura dos adesivos contendo resinas à base de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído	31
Figura 10 - Mistura homogeneizada para o adesivo à base de uréia-formaldeído...32	32
Figura 11 - Lâmina em cima da balança	32
Figura 12 - Pesagem do adesivo por lâmina	33
Figura 13 - Espalhamento do adesivo	33
Figura 14 - Sobreposição das lâminas	34
Figura 15 - Etapa de prensagem.....	34
Figura 16 - Pesagem da resina à base de fenol-formaldeído.....	35
Figura 17 - Materiais utilizados para a mistura do adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona.....	36
Figura 18 - Pesagem do pré-polímero e polioliol	37
Figura 19 - Mistura do pré-polímero com o polioliol com a batedeira	37
Figura 20 - Corte dos corpos de prova em marcenaria	39
Figura 21 - Corpos de prova para ensaios de flexão.....	39
Figura 22 - Corpos de prova para ensaios de cisalhamento	40
Figura 23 - Dimensões dos corpos de prova para ensaios de cisalhamento	40
Figura 24 - Dimensões dos corpos de prova para ensaios de flexão.....	40
Figura 25 - Distância entre os vãos.....	41
Figura 26 - Largura no meio do corpo de prova	41
Figura 27 - Ensaio de flexão.....	42
Figura 28 - Esquema dos corpos de prova para os ensaios de flexão.....	43
Figura 29 - Delimitação de distâncias para os ensaios de flexão.....	43
Figura 30 - Ensaio de cisalhamento	44
Figura 31 - Separação dos corpos de prova por painel para o pré-tratamento de fervura	45
Figura 32 - Massa específica dos painéis confeccionados com o adesivo de poliuretano e com os adesivos à base de formaldeído	47
Figura 33 - Massa específica dos painéis confeccionados com o adesivo de poliuretano a diferentes gramaturas.....	48
Figura 34 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento seco para o adesivo de poliuretano e os à base de formaldeído.....	49
Figura 35 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento água fria para o adesivo de poliuretano e os à base de formaldeído.....	49
Figura 36 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento ciclo de fervura para o adesivo de poliuretano e o à base de fenol-formaldeído.....	50

Figura 37 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento fervura para o adesivo de poliuretano e o à base de fenol-formaldeído.....	50
Figura 38 - Corpos de prova com alta (a) e baixa (b) porcentagem de falha da madeira	51
Figura 39 - Alguns corpos de prova de cisalhamento após tratamento de ciclo e fervura	52
Figura 40 - Resultados de módulo de ruptura (MOR) obtidos com os ensaios de flexão estática para os diferentes adesivos.....	53
Figura 41 - Resultados de módulo de elasticidade (MOE) obtidos com ensaios de flexão estática para os diferentes adesivos.....	53
Figura 42 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento seco para o adesivo de poliuretano nas diferentes gramaturas utilizadas.....	55
Figura 43 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento água fria para o adesivo de poliuretano nas diferentes gramaturas utilizadas.....	56
Figura 44 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento ciclo de fervura para o adesivo de poliuretano nas diferentes gramaturas utilizadas.....	56
Figura 45 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento fervura para o adesivo de poliuretano nas diferentes gramaturas utilizadas.....	57
Figura 46 - Resultados de módulo de ruptura (MOR) obtidos com os ensaios de flexão estática para as diferentes gramaturas do adesivo de poliuretano	58
Figura 47 - Resultados de módulo de elasticidade (MOE) obtidos com ensaios de flexão estática para as diferentes gramaturas do adesivo de poliuretano	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros referentes à confecção de painéis compensados	30
Tabela 2 - Quantidades de pré-polímero e poliol utilizadas na preparação de painéis com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona para as diferentes gramaturas	38
Tabela 3 - Resultados médios de resistência ao cisalhamento de painéis compensados produzidos com os adesivos (180 g/m ²)	75
Tabela 4 - Resultados médios de flexão estática paralela às fibras de painéis compensados produzidos com adesivos poliuretano, fenol-formaldeído e uréia-formaldeído (180 g/m ²)	76
Tabela 5 - Resultados médios de flexão estática perpendicular às fibras de painéis compensados produzidos com adesivos poliuretano, fenol-formaldeído e uréia-formaldeído (180 g/m ²)	76
Tabela 6 - Resultados médios de resistência ao cisalhamento de painéis compensados produzidos com adesivo poliuretano em diferentes gramaturas	77
Tabela 7 - Resultados médios de flexão estática paralela às fibras de painéis compensados produzidos com adesivo poliuretano em diferentes gramaturas	78
Tabela 8 - Resultados médios de flexão estática perpendicular às fibras de painéis compensados produzidos com adesivo poliuretano em diferentes gramaturas	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos adesivos para a madeira	23
--	----

LISTA DE SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
CV	Coefficiente de Variação
FF	Fenol-Formaldeído
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
MDF	Medium-density fiberboard
MDI	Difenilmetano Diisocianato
ME _{12%}	Densidade Aparente a um teor de umidade de 12%
MOE	Módulo de Elasticidade
MOR	Módulo de Ruptura
OSB	Oriented Strandboard
PU	Poliuretano
RLC	Resistência à Linha de Cola
TDI	Tolueno Diisocianato
UF	Uréia-Formaldeído
UFPR	Universidade Federal do Paraná
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 ESTRUTURAS MACROSCÓPICAS DA MADEIRA	14
2.1.1 Casca e câmbio	14
2.1.2 Alburno e cerne	14
2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	15
2.2.1 Celulose	16
2.2.2 Hemicelulose	16
2.2.3 Lignina	16
2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA PARA COLAGEM	17
2.3.1 Densidade básica e aparente	17
2.3.2 Porosidade	17
2.3.3 Umidade	18
2.4 PAINÉIS	18
2.5 ADESÃO	19
2.6 ADESIVOS	21
2.6.1 Histórico dos adesivos	21
2.6.2 Adesivos e os produtos de madeira	22
2.6.3 Adesivos e emissão de compostos orgânicos voláteis	24
2.6.4 Adesivos poliuretanos	25
2.6.5 Os polióis derivados de óleos vegetais	27
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 LÂMINAS DE MADEIRA	29
3.2 ADESIVOS	30
3.3 CONFECÇÃO DOS PAINÉIS	30
3.3.1 Painéis compensados com o adesivo à base de uréia-formaldeído	31
3.3.2 Painéis compensados com o adesivo à base de fenol-formaldeído	35
3.3.3 Painéis compensados com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona	36
3.4 ENSAIOS MECÂNICOS	39
3.4.1 Medição dos corpos de prova	41
3.4.2 Ensaios de flexão estática	42
3.4.3 Ensaios de cisalhamento	44
3.4.4 Análise estatística dos dados	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 EFEITO DO ADESIVO	48
4.2 EFEITO DA GRAMATURA	55
5 CONCLUSÕES	61
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICE A – Delineamento das formulações dos adesivos à base de formaldeído	69
APÊNDICE B – Materiais utilizados para a confecção dos painéis compensados	72
APÊNDICE C – Tabelas com os resultados referentes aos ensaios mecânicos	74

1 INTRODUÇÃO

A madeira possui propriedades únicas quando empregada como material para a construção, tais como força, flexibilidade, resistência ao fogo, durabilidade e isolamento (IWAKIRI, 2005). A colagem da madeira desempenha um papel cada vez mais importante na indústria de produtos florestais (PRATA, 2006). O principal uso de adesivos é na fabricação de materiais de construção, tais como, painéis compensados, OSB, painéis aglomerados, MDF, madeira composta estrutural, portas, janelas, além de produtos de madeira laminada (KABOORANI *et al.*, 2012).

Os painéis compensados são comumente utilizados no setor da construção civil para fabricação de formas para concreto e revestimentos (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). As colas comerciais mais utilizadas na produção desses painéis são aquelas à base de resina fenol-formaldeído e uréia-formaldeído (DIAS, 2005). Tais adesivos liberam formaldeído que é uma substância cancerígena e/ou mutagênica (COHEN, 1996).

Com base nesse contexto, é necessário desenvolver tecnologias que sejam ao mesmo tempo menos agressivas à saúde e ao meio ambiente e viáveis economicamente. A utilização dessas tecnologias traz muitas vantagens tais como: redução de riscos na produção (DIAS *et LAHR*, 2004); redução da produção de resíduos perigosos (EBNESAJJAD, 2011); eliminação de emissões atmosféricas; eliminação de riscos à saúde e à segurança (AZEVEDO, 2009).

O adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona é uma alternativa para eliminar a emissão de formaldeído dos adesivos comerciais utilizados em painéis compensados (JESUS, 2010). Ele é produzido a partir de uma matéria-prima renovável, possui boas propriedades mecânicas e sua produção é viável comercialmente (DIAS; LAHR, 2004).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas de painéis compensados produzidos com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Comparar o comportamento mecânico do adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona com os adesivos comerciais à base de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído, para verificar se a substituição é viável para a produção de painéis compensados;
- avaliar o efeito da gramatura do adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona sobre as propriedades mecânicas dos painéis compensados, buscando estabelecer sua otimização.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A madeira é uma estrutura complexa relacionada a atividades químicas e células de diversos tipos que em conjunto vão suprir as necessidades de uma planta. Todas as suas propriedades sejam elas físicas, mecânicas, químicas, biológicas ou tecnológicas estão ligadas a essas necessidades (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

As angiospermas, ou folhosas, e as gimnospermas, coníferas, são os dois grupos de plantas que dão origem à madeira. A diferença mais importante entre a madeira gerada por cada um desses grupos é que as folhosas possuem vasos específicos para a condução da seiva; enquanto nas coníferas esses vasos também exercem a função de sustentação do tronco (JESUS, 2010).

Na Figura 1 é mostrada a seção transversal da madeira de coníferas e folhosas e deixa claro a diferença entre esses dois grupos: as diversas estruturas brancas largas e redondas são vasos ou poros típicos de folhosas (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

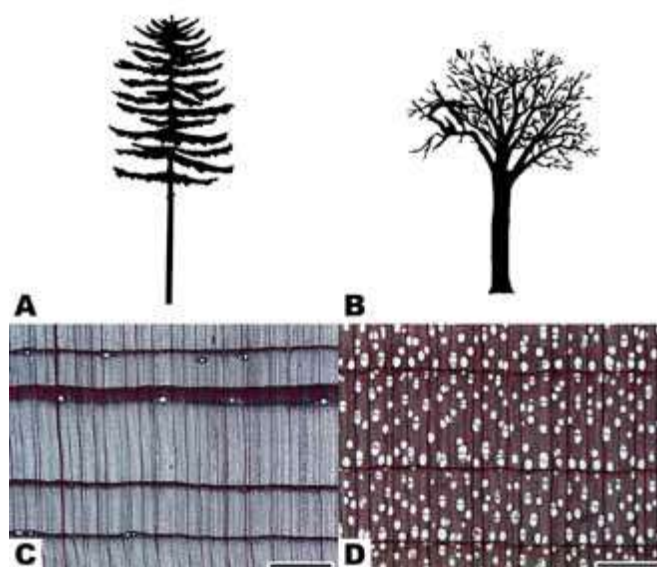


Figura 1 - A, forma genérica de uma conífera. B, forma genérica de uma folhosa. C, seção transversal de *Pseudotsuga mensiezii*, uma típica conífera. D, seção transversal de *Betula allegheniensis*, uma típica folhosa. Escala 780 μm .

Fonte: FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010

2.1 ESTRUTURAS MACROSCÓPICAS DA MADEIRA

Os principais elementos macroscópicos da madeira são: casca externa e interna, câmbio, cerne e alburno, como mostrado na Figura 2 a seguir (KLOCK *et. al.*, 2005):



Figura 2 - Estrutura macroscópica da madeira
Fonte: KLOCK *et. al.*, 2005

2.1.1 Casca e câmbio

A casca interna é constituída pelo floema e a casca externa é formada pelo córtex, periderme e ritidoma. As principais funções da casca são: armazenamento, condução de nutrientes, proteção mecânica, proteção contra o ressecamento, ataques fúngicos e variações do clima (BURGER; RICHTER, 1991).

O câmbio é constituído por uma camada de células vivas entre o xilema e o floema e tem a função de gerar células para a formação do xilema e da casca (BURGER; RICHTER, 1991).

2.1.2 Alburno e cerne

A maioria das células que forma a madeira têm a função de sustentação mecânica e/ou condução. As células de sustentação ou condução de água são mortas na maturidade funcional (KLOCK *et. al.*, 2005).

O alborno localiza-se na porção mais externa do tronco e é constituído de células fisiologicamente ativas. Ele tem a função de conduzir a seiva, armazenamento e síntese de compostos bioquímicos. O cerne, localizado na porção central do tronco e de coloração mais escura, é composto de células mortas com função de suporte mecânico. Em longo prazo, para algumas espécies, ele também tem a função de armazenar muitas variedades bioquímicas denominadas extrativos. Estes exercem a função de proteção da madeira (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A celulose, hemicelulose e lignina são os principais componentes macromoleculares constituintes da parede celular (KLOCK *et. al.*, 2005). Na Figura 3 é mostrado que tanto a hemicelulose, quanto a celulose possuem grupamentos OH^- nas extremidades de suas cadeias. Este aspecto é muito importante para esse estudo, uma vez que o cianato (NCO^+) presente no adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona vai reagir com o OH^- e água, neutralizando-se assim seu efeito tóxico, já que ele não estará sob forma livre.

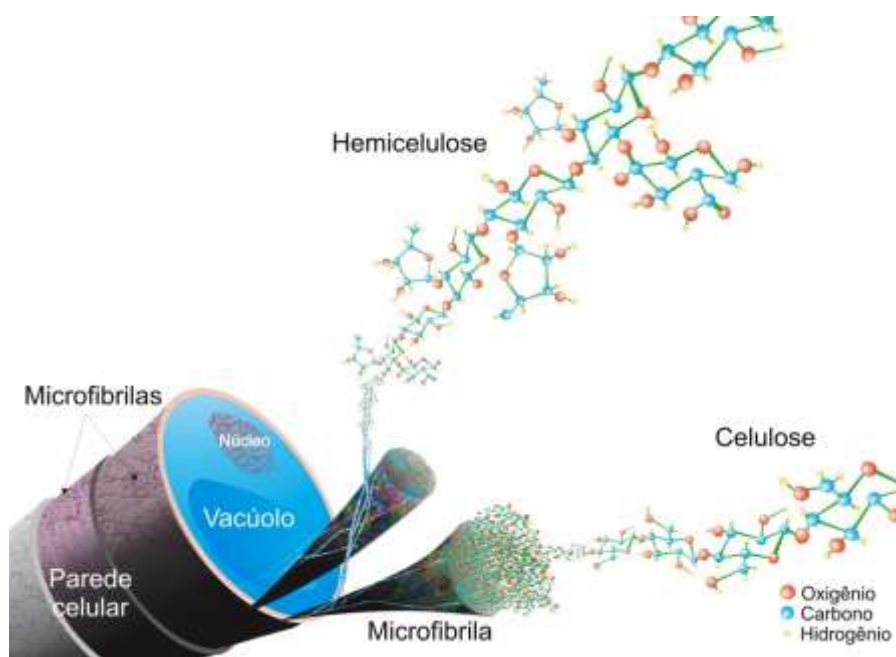


Figura 3 - Composição química da celulose e da hemicelulose
Fonte: <http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAAFuLUAD-1.jpg>

2.2.1 Celulose

A celulose é um polissacarídeo regular composto de unidades repetitivas de D-glucopirranose com ligações 1,4- β glucosídicas que formam longas cadeias. Essas cadeias denominam-se fibras elementares. Elas possuem ligações intermoleculares por pontes de hidrogênio e forças de Van der Waals envelopadas em uma matriz de hemicelulose e lignina que impedem os ataques químicos (IOELOVICH, 2008).

2.2.2 Hemicelulose

A hemicelulose faz parte de um grande grupo de polissacarídeos encontrados na parede celular primária e secundária da célula vegetal (SUN; SUN; TOMKINSON, 2004). Os principais açúcares neutros que a compõe são as glucoses, manoses, galactoses, constituídos por 6 carbonos; e as xiloses e arabinoses, constituídos por 5 carbonos (KLOCK *et. al.*, 2005).

2.2.3 Lignina

A lignina pode ser encontrada na proporção de 15 a 40% na madeira. Ela age como impermeabilizante e desempenha um papel importante na regulação do transporte de água através da parede celular. Além disso, ela pode ser considerada como uma cola permanente que mantém as células unidas no tronco, conferindo-lhe rigidez e resistência ao impacto (THIELEMANS; WOOL, 2005).

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA PARA COLAGEM

A qualidade de colagem é afetada pelas propriedades da superfície da madeira e também pelas suas propriedades físicas. Dentre as propriedades mais relevantes estão a densidade, a porosidade, o conteúdo de umidade, a resistência e a capacidade de retração e inchamento (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Adiante serão abordadas a densidade, a porosidade e o conteúdo de umidade.

2.3.1 Densidade básica e aparente

A densidade básica é a massa de madeira seca em relação ao seu volume saturado e é resultante da porcentagem dos seus constituintes, tais como celulose, hemicelulose, lignina e extrativos. Além disso, é influenciada pelas dimensões do lúmen das fibras ou traqueídeos (SCANAVACA JUNIOR; GARCIA, 2004). A densidade aparente é aquela determinada por um dado teor de umidade da madeira ou do produto de madeira (MORESCHI, 2005).

Em madeiras mais porosas o adesivo possui maior penetração, enquanto em madeiras mais densas há maior alteração dimensional e, conseqüentemente, maiores tensões na linha de cola (VICK, 1999 *apud* DIAS, 2005).

2.3.2 Porosidade

A porosidade está relacionada com as aberturas da madeira relativas à passagem de líquidos ou gases. Quando a porosidade da madeira é menor, isso significa que ela é menos permeável. Conseqüentemente, a composição de um adesivo para uma madeira mais porosa será diferente em relação a uma madeira menos porosa (ALBUQUERQUE; FIQUEIREDO, 2000).

2.3.3 Umidade

A madeira pode absorver água do ar até o ponto de saturação das fibras. Abaixo desse ponto a madeira se retrai e se torna mais rígida; acima desse ponto a madeira incha. O excesso de água preenche os lúmens e torna a madeira mais pesada. A variação dimensional que acompanha as variações de umidade na madeira vai influenciar no desempenho da colagem. Em geral, a otimização das propriedades do adesivo ocorre quando a madeira possui teor de umidade entre 6% e 14% (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

2.4 PAINÉIS

Os painéis de madeira são fabricados em lâminas ou em diferentes estágios de desagregação da madeira, aglutinados pela ação de pressão e temperatura, algumas vezes utilizando-se resinas (MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008). Segundo Macedo e Roque (1997), existem basicamente dois grupos de painéis de madeira: laminados e particulados. Os primeiros são formados por lâminas de madeira coladas umas sobre as outras (MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008). Os particulados são produzidos com partículas de madeira com resina sintética, aplicação de calor e pressão com graus diferentes de desagregação das fibras (IWAKIRI, 2005).

A produção e o consumo desses produtos estão atualmente equilibrados entre três principais mercados: Ásia e Pacífico, Europa e América do Norte. Em 2005, a produção e o consumo global de painéis de madeira foi de 234 e 241 milhões de m³, respectivamente. Estima-se que em 2030 esses números aumentarão para 521 milhões de m³, tanto para produção quanto para consumo (FAO, 2009). Para a fabricação desses painéis utilizam-se resinas que contêm solventes tóxicos. Estes, em razão do seu baixo ponto de ebulição, são liberados para a atmosfera e causam danos à saúde e ao meio ambiente (AZEVEDO, 2009). Desse modo, é necessário encontrar alternativas de produção desses produtos menos nocivas à saúde e ao meio ambiente. O adesivo de poliuretano derivado de

óleo de mamona é uma alternativa para a substituição dos adesivos que contêm resinas à base de formaldeído.

O painel compensado é produzido a partir da colagem de lâminas de madeira, de forma que o sentido das fibras de cada lâmina seja ortogonal uma em relação à outra. As espessuras das lâminas variam de 1 a 5 mm. Elas passam por um processo de secagem natural ou artificial e a colagem é feita sob pressão, utilizando-se prensas a frio ou a quente juntamente com o adesivo (IWAKIRI, 2005).

Usualmente a estrutura deve ser simétrica próximo ao ponto médio. Em decorrência da maneira como as lâminas são arranjadas no painel compensado, o movimento dentro no plano do painel é mínimo. A grã da madeira encontra-se em ângulos retos nas camadas alternadas. O alinhamento axial das fibras de uma lâmina restringe o movimento tangencial das lâminas adjacentes. O painel resultante possui propriedades de retração e resistência similares nessas duas direções e dessa forma, as grandes alterações dimensionais e os baixos valores de resistência que ocorrem ao longo das fibras em madeira maciça são eliminados (SHI; WALKER, 2006).

As vantagens da madeira compensada em relação à maciça são: limitação de defeitos em peças grandes, redução da tração e do inchamento, maior resistência na direção normal às fibras, redução de trincas na cravação de pinos metálicos e possibilidade de se utilizar madeiras com diferentes resistências (PFEIL; PFEIL, 2003).

2.5 ADESÃO

A adesão pode ser definida como um fenômeno ou um estado em que dois corpos estão unidos. Ela envolve desde forças entre os átomos em uma interface, bem como respostas mecânicas do adesivo, do substrato e da própria interface (PACKHAM, 2005).

Segundo Iwakiri (2005) a adesão é um fenômeno físico-químico de interação entre superfícies sólidas e uma segunda fase que pode ser constituída por moléculas, gotículas, de uma película contínua, entre outros.

As ações primárias de um adesivo são as de molhar e de se espalhar na superfície do substrato para preencher um espaço existente e, conseqüentemente, formar uma ligação permanente entre eles, Figura 4, (PADDAY, 2005).

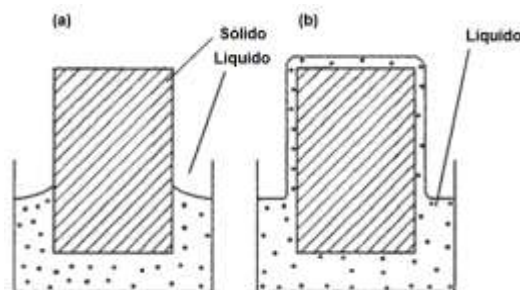


Figura 4 - Ações de molhar (a) e espalhar (b) de um adesivo
Fonte: Adaptado Padday, 2005

O fenômeno físico-químico da adesão é decorrente de forças atrativas intermoleculares. Tais forças podem ser eletrostáticas, forças de Van der Waals (interações dipolo-dipolo e dipolo-dipolo induzido) (VAN DER WAALS, 1910), forças de dispersão, interações por pontes de hidrogênio e interações por compartilhamento de pares de elétrons (ligações covalentes e interações ácido-base) (GALEMBECK; GANDUR, 2013).

Além disso, pode-se citar os mecanismos físico-químicos de adesão, tais como: tensão superficial, capilaridade, travamento mecânico e difusão interfacial, que também estão envolvidos no fenômeno da adesão (PADDAY, 2005).

A tensão superficial é definida como o trabalho necessário para aumentar a área de uma superfície isotermicamente e reversivelmente de uma unidade de área. Ela corresponde à energia superficial necessária para gerar uma deformação em um fluido e é expressa em energia por área (EBNESAJJAD, 2011).

A capilaridade é um fenômeno que ocorre quando um líquido molha duas superfícies paralelas (GALEMBECK; GANDUR, 2013). O travamento mecânico está relacionado à formação de ganchos mecânicos entre o adesivo e as cavidades, poros e rugosidades da superfície sólida, sendo um dos fatores determinantes na resistência do adesivo. Finalmente, a difusão interfacial é o mecanismo que envolve a difusão mútua das macromoléculas ao longo da interface, ou seja, a mobilidade molecular dos substratos. Quando ocorre a difusão entre as superfícies em contato há probabilidade de que ocorra adesão (SCHULTZ; NARDIN, 2003).

2.6 ADESIVOS

Os adesivos são substâncias utilizadas para unir dois ou mais elementos (IWAKIRI, 2005). Estes podem ser encontrados para a colagem sob a forma líquida ou pastosa, granular, ou mesmo como filmes ou pós. Normalmente, são obtidos a partir de misturas de polímeros e resinas e tornam-se sólidos através de secagem, polimerização, cura por meio de enrijecedor, entre outros métodos (COGNARD, 2005).

2.6.1 Histórico dos adesivos

Pizzi e Mittal (2003) afirmam que a primeira fábrica de adesivos para fins comerciais foi fundada na Holanda em 1690 e que os adesivos à base de caseína começaram a ser manufaturados na Alemanha e na Suíça por volta do início do século XIX. Eles mencionam que adesivos à base de amido eram utilizados em selos postais por volta de 1840 e que a primeira patente americana de um adesivo à base de dextrina foi emitida em 1867.

Os adesivos para a madeira são usados há muito tempo. Segundo Iwakiri (2005), em 3000 A.C os egípcios produziam lâminas de madeira para utilização em peças de mobiliário e sarcófagos. Observou-se que haviam peças com características semelhantes às de painel compensado, sendo que as lâminas eram possivelmente coladas com adesivos à base de albumina.

Pesquisas relacionadas à interação entre a madeira e os adesivos foram realizadas nos últimos 85 anos. No século passado observou-se um grande avanço da química, compreensão do processo de adesão e conhecimento sobre os aspectos de durabilidade (FRIHART, 2005).

O primeiro adesivo para a madeira baseado em polímeros sintéticos foi produzido comercialmente em torno de 1930 (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Era a resina à base de fenol-formaldeído, desenvolvida em 1929. Em 1931, houve o surgimento da resina à base de uréia-formaldeído. Em meados dos anos

40, produziu-se a melamina-formaldeído e em 1943, a resorcina-formaldeído (TSOUMIS, 1991).

A patente para poliuretanos, concedida a Otto Bayer em 1937, foi um marco importante para a história dos adesivos. Porém, a produção de adesivos poliuretanos começou a ser realizada por volta de 1950, sendo hoje um dos adesivos mais utilizados. Principalmente em razão da sua grande flexibilidade de formulações diversas para diferentes utilizações (BROCKMANN, 2009).

O adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona começou a ser desenvolvido no Brasil na década de 80 pelo Instituto de Química de São Carlos/USP (JESUS, 2000). Obtido à partir de fonte renovável, não possui solventes em sua composição. Portanto, não libera compostos nocivos à saúde, nem ao meio ambiente e sua produção é comercialmente viável.

2.6.2 Adesivos e os produtos de madeira

A adesão envolve fatores químicos e mecânicos que controlam a habilidade do adesivo de manter unidas duas superfícies de madeira. As ligações mais duráveis e resistentes à água se desenvolvem quando o adesivo atinge as cavidades das células e infiltra dentro da parede celular. As forças intermoleculares tais como forças de Van der Waal's, dipolo-dipolo e ligações de hidrogênio são muito importantes para a resistência de ligação em decorrência da elevada área de contato do adesivo com a madeira (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

As características físico-químicas do adesivo, a composição e as características da madeira são fatores que influenciam no processo de colagem da madeira. Com relação às primeiras, pode-se destacar a viscosidade do adesivo, o tempo de gelatinização e o pH da resina (DIAS, 2005).

A viscosidade aumenta a dificuldade de esparramento, diminui as propriedades de umectação e penetração do adesivo na estrutura capilar da madeira, tornando a linha de cola mais espessa. Como consequência, a qualidade de colagem é inferior. O tempo de gelatinização relaciona-se à vida útil do adesivo, ou seja, o ponto de máxima viscosidade para aplicação. Recomenda-se que o pH da

resina não ultrapasse o intervalo de 1,5 e 11, para evitar degradação das fibras e má qualidade de colagem (DIAS, 2005).

Os principais fatores relevantes que devem ser considerados na seleção de um adesivo para a madeira são (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010):

- Resistência: a carga que o adesivo deverá suportar;
- durabilidade: exposição do adesivo ao tipo de ambiente;
- molhabilidade: compatibilidade entre a superfície do substrato e o adesivo;
- tempo de embalagem: duração do tempo antes da aplicação do adesivo;
- tempo aberto: intervalo de tempo entre a aplicação e a junção das peças;
- tempo fechado: é o tempo decorrido entre a junção das peças e a aplicação de pressão;
- tempo de pressão: duração do tempo até a peça ser descomprimida;
- viscosidade: deve ser compatível com o método de aplicação; além disso, o adesivo deve ser fluído suficientemente para preencher os espaços vazios da madeira;
- mistura: definição do método correto em função dos materiais a serem misturados.

Os diversos tipos de adesivos empregados nas diferentes utilizações da madeira estão demonstrados no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos adesivos para a madeira

(continua)

Adesivos	Base	Uso	Condições de uso
Origem natural			
Proteína animal	Proteínas de peixe, de cartilagem, de ossos, de tendões	Montagem de mobiliário e instrumentos de cordas	Ambientes internos não agressivos
Sangue	Albumina de sangue	Compensados	
Caseína	Proteína do leite	Madeira laminada, especialmente portas interiores	Ambientes internos e externos; baixa resistência ao intemperismo
Soja	Amido, farinha de soja	Compensados	
Tanino	Acácia, Quebracho	Compensados, aglomerados	
Origem sintética			
Emulsão reticulada acetato de polivinil	Emulsão termoplástica	Portas, formas, carpintaria, camadas celulósicas	Ambientes internos e externos

Quadro 1 – Classificação dos adesivos para a madeira

(conclusão)

Elastomérica contato	Elastômero	Móveis, madeira laminada, papel, metal, plástico	Ambientes internos
Adesivo para construção	Elastômero	Compensado, aglomerado, madeira laminada, etc.	Ambientes internos
Epóxi	Resina termofixa	Reparos estruturais	Exteriores e interiores úmidos, boa resistência mecânica
Hot melt	Blocos sólidos, filmes	Móveis	Ambientes internos, resistência moderada à umidade
Isocianato	Resina termofixa	Aglomerados	Ambientes internos
Melamina e melamina-uréia-formaldeído	Resina termofixa	Painéis em geral	Ambientes internos e externos, boa resistência mecânica, baixa resistência à umidade
Fenol-formaldeído	Resina termofixa	Compensados, aglomerados	Ambientes externos, boa resistência mecânica
Emulsão acetato de polivinil	Emulsão termoplástica	Móveis	Ambientes internos, resistência baixa à umidade
Poliuretano	Resina termofixa	Uso estrutural	Ambientes internos e externos, resistentes ao intemperismo e boa resistência mecânica
Resorcinol e fenol-resorcinol-formaldeído	Resina termofixa	Compensados, estrutura, madeira laminada	Interiores e exteriores, boa resistência mecânica
Uréia-formaldeído	Resina termofixa	Compensados, aglomerados	Ambientes interiores, boa resistência mecânica

Fonte: Adaptado de DIAS, 2005

2.6.3 Adesivos e emissão de compostos orgânicos voláteis

Os compostos orgânicos voláteis são poluentes atmosféricos que contribuem para a formação do ozônio troposférico e de partículas - principais componentes do *smog*. Estudos recentes confirmam os efeitos do *smog* sobre o meio ambiente e a saúde humana, mostrando que a poluição atmosférica aumenta o risco de câncer de pulmão e de doenças cardíacas (ENVIRONNEMENT CANADA, 2011), podem causar problemas auditivos (FUENTE; McPHERSON, 2006), respiratórios (TORÉN, 2010; ALVIM *et al.*, 2011), entre outros.

O formaldeído integra o grupo de compostos orgânicos voláteis (COVs) que é um grupo de compostos que possuem baixo peso molecular, baixa solubilidade em

água e baixo ponto de ebulição (WANG *et al.*, 1996). Eles são cancerígenos e/ou mutagênicos (COHEN, 1996).

Os principais adesivos utilizados na fabricação de painéis compensados são os que contêm resinas à base de fenol-formaldeído e uréia-formaldeído (IWAKIRI, 2005). Eles liberam formaldeído que é uma substância altamente tóxica (CAMPOS; LAHR, 2007; BOLOGNESI, 2010), sendo que as resinas que contêm uréia-formaldeído possuem taxas de volatilização mais altas (JAAKKOLA; QUANSAH, 2010).

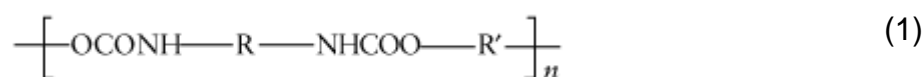
Em junho de 2004, a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer modificou a classificação do formaldeído do grupo 2A - substância provavelmente cancerígena para o homem - para o grupo 1 - substância comprovadamente cancerígena para o homem (SOLAL *et al.*, 2008).

A Agência Internacional de Pesquisas sobre o Câncer (IARC) recomenda a utilização de resinas que liberam menos formaldeído (IARC, 2004). A tendência em adesivos é o desenvolvimento de *solvent free*. As pesquisas são no sentido de desenvolver materiais sem solvente e com matéria-prima de fonte renovável, tais como: poliuretano derivado de óleo de mamona, poliuretano de amido, entre outros (AZEVEDO, 2009).

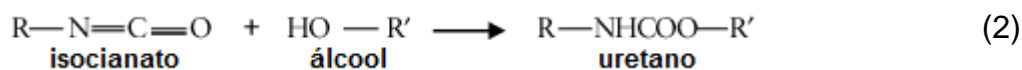
O adesivo de poliuretano à base de óleo de mamona é uma alternativa que possui vantagens competitivas em relação aos demais polímeros, basicamente, em razão de três fatores: é obtido a partir de matéria-prima renovável e natural; não possui solvente em sua composição; e possui propriedades mecânicas superiores às dos polímeros derivados de petróleo (DIAS; LAHR, 2004).

2.6.4 Adesivos poliuretanos

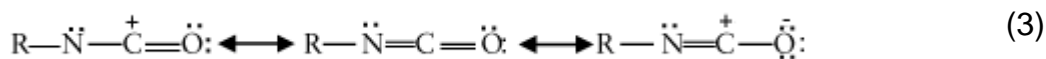
Os poliuretanos pertencem a um grupo especial de polímeros heterogêneos caracterizados pela seguinte unidade estrutural:



Os grupos uretanos – NH – COO – são ésteres de ácido carbâmico. É possível sintetizá-los por diversos métodos, porém o mais importante é através da reação entre um isocianato e um álcool (IONESCU, 2005):



O grupo isocianato é altamente reativo com compostos ativos de hidrogênio e isto pode ser explicado devido às seguintes estruturas ressonantes:



O centro nucleófilo desses compostos ativos (o átomo de oxigênio dos grupos hidroxilas ou dos átomos de nitrogênio, no caso das aminas) ataca o átomo de carbono eletrofílico e o hidrogênio adiciona ao átomo de nitrogênio os grupos – NCO (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

Os isocianatos mais utilizados são aromáticos: o tolueno diisocianato (TDI) e o difenilmetano diisocianato (MDI) (SZYCHER, 2012). Estes compostos são tóxicos. Contudo, após reação com álcool eles se tornam inertes. O adesivo de poliuretano derivado do óleo de mamona utiliza o MDI misto como diisocianato. Este composto é uma mistura de 2,2 MDI com 2,4 MDI, Figura 5.

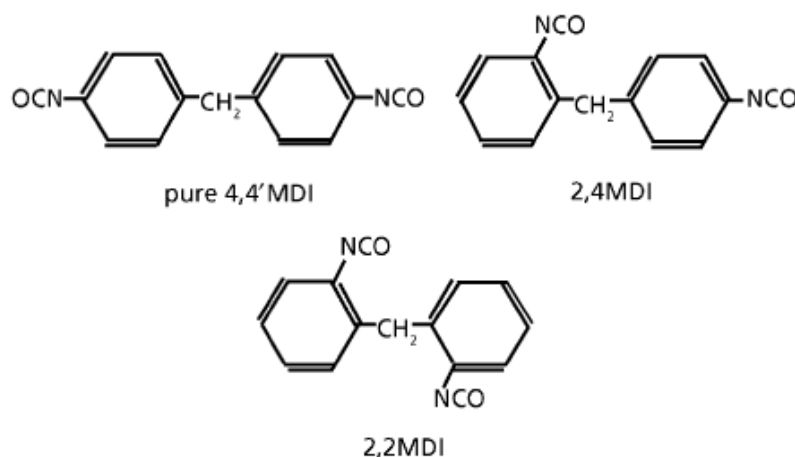


Figura 5 - Estruturas químicas de MDI
Fonte: IONESCU, 2005 adaptado pelo autor

2.6.5 Os polióis derivados de óleos vegetais

Óleos vegetais são fontes importantes de polióis e dentre os óleos utilizados para a síntese de poliuretanos, destacam-se aqueles altamente insaturados, que através de várias reações químicas, as duplas ligações são transformadas em grupos hidroxila. Nesta categoria se encontram: o óleo de soja, óleo de girassol, óleo de milho, óleo de oliva, óleo de mamona, entre outros (IONESCU, 2005).

O óleo de mamona é um triglicerídeo de ácido ricinoléico extraído de sementes da planta *Ricinus communis*. O ácido ricinoléico possui 18 átomos de carbono, uma dupla ligação (C9 – C10) e um grupo hidroxila secundário. A sua estrutura é mostrada pela Figura 6 a seguir (AZEVEDO, 2009):

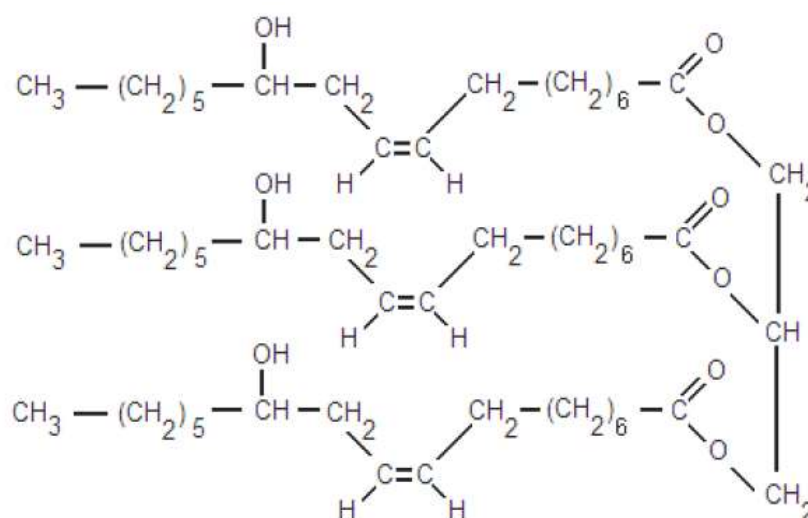


Figura 6 - A estrutura do triglicerídeo de ácido ricinoléico
Fonte: AZEVEDO, 2009

O adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado neste trabalho é o Polibond, fornecido pela empresa Cequil – Araraquara – SP, a qual comercializa produtos derivados de óleo vegetal. Ele se encontra sob forma bicomponente composta de um polioliol e de um pré-polímero. O poliuretano é obtido por meio de uma reação de policondensação. O polioliol, a partir do óleo de mamona e o pré-polímero, a partir do difenil metano diisocianato (MDI). Em seguida, este é pré-polymerizado com polioliol, sendo que uma porcentagem de isocianato é destinada a uma posterior reação (AZEVEDO, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma geral das atividades realizadas para cada um dos adesivos testados mecanicamente: à base de óleo de mamona, fenol-formaldeído e uréia-formaldeído, está demonstrado na Figura 7.

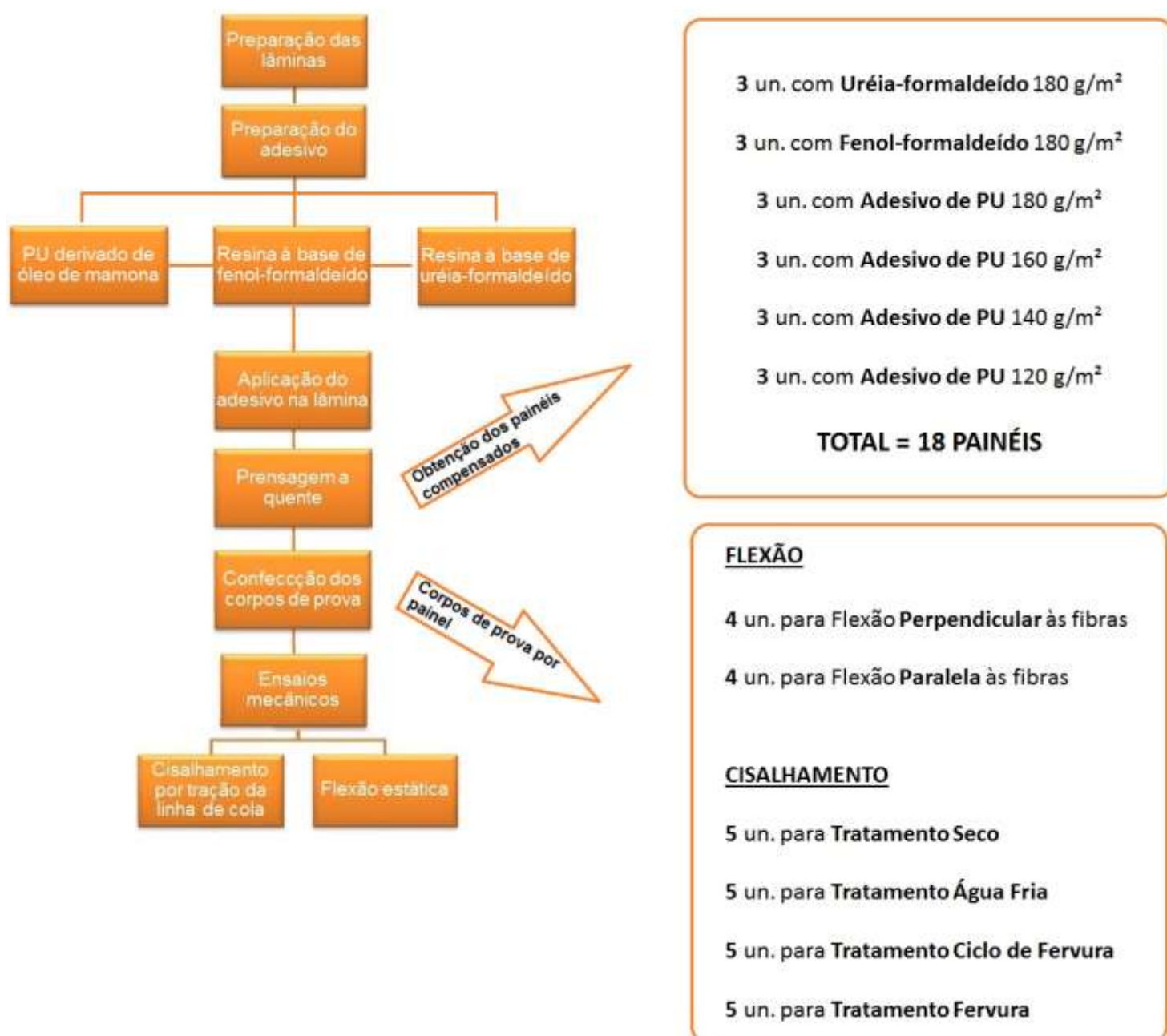


Figura 7 - Fluxograma geral de atividades

3.1 LÂMINAS DE MADEIRA

As lâminas de madeira de *Pinus caribaea bahamensis* foram, gentilmente, cedidas pelo Laboratório de Painéis de Madeira da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A escolha da espécie foi baseada na disponibilidade de lâminas para a confecção dos painéis e na utilização de espécies diferentes daquelas que já foram utilizadas para a realização de ensaios similares encontradas na literatura.

A quantidade de 90 lâminas de 500x500x2 mm de diferentes qualidades da espécie *Pinus caribaea bahamensis* foram separadas. As respectivas lâminas foram secas em estufa, por 24 horas antes da colagem para que a madeira pudesse atingir um teor de umidade entre 6% e 8%. Dentro deste intervalo, ocorre a otimização das propriedades do adesivo (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010), Figura 8. Para cada painel foram separadas cinco lâminas, sendo: para a parte externa, duas de boa qualidade, isto é, livres de nós, rachaduras, ou qualquer outro defeito. Para a parte interna, as outras três de qualidade inferior.



Figura 8 - Secagem de lâminas

3.2 ADESIVOS

O adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona foi gentilmente doado pela empresa Cequil; já os adesivos à base de fenol-formaldeído e uréia-formaldeído foram disponibilizados pelo laboratório de Painéis de Madeira da UFPR.

3.3 CONFECÇÃO DOS PAINÉIS

Os painéis compensados foram produzidos com cinco lâminas utilizando-se os adesivos à base de uréia-formaldeído, fenol-formaldeído e o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona.

Outros painéis compensados também foram confeccionados com o adesivo de poliuretano variando-se a gramatura para verificar o efeito da quantidade do adesivo no painel. No total, foram confeccionados 18 painéis, sendo três repetições para cada tipo de adesivo e gramatura.

As formulações dos adesivos de uréia e fenol-formaldeído estão detalhadas no Apêndice A. Os parâmetros referentes à confecção dos painéis compensados com gramatura de 180 g/m² estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros referentes à confecção de painéis compensados

Adesivo	Temperatura (°C)	Gramatura (g/m²)	Tempo (min)	Pressão (MPa)
Uréia-formaldeído	110		8	
Fenol-formaldeído	130	180	10	1
PU derivado de óleo de mamona	90		20	

Condições idênticas demonstradas na Tabela 1, foram utilizadas para o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona e aplicadas para a confecção dos painéis compensados com as gramaturas de 160 g/m², 140 g/m² e 120 g/m².

Para cada variação de gramatura, foram realizadas três repetições, como mencionado anteriormente.

3.3.1 Painéis compensados com o adesivo à base de uréia-formaldeído

Na Figura 9, são demonstrados os materiais utilizados na preparação dos adesivos à base de formaldeído. O detalhamento dos materiais está descrito no Apêndice B.



Figura 9 - Materiais utilizados para a mistura dos adesivos contendo resinas à base de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído

A confecção de painéis compensados com o adesivo à base de uréia-formaldeído obedeceu às seguintes etapas:

- 1 - em um recipiente metálico, foi pesada a quantidade de 423,42 g de resina;
- 2 – em um béquer de plástico, foi pesada a quantidade de 84,66 g de água;
- 3 – em um béquer de plástico, foi pesada a quantidade de 84,66 g de farinha de trigo;
- 4 – em um béquer de vidro, foi pesada a quantidade de 7,2 g de catalisador;
- 5 – com o auxílio de uma batedeira, todos os ingredientes foram misturados durante 5 minutos, até que a mistura ficasse homogeneizada, conforme se observa na Figura 10;



Figura 10 - Mistura homogeneizada para o adesivo à base de uréia-formaldeído

6 – uma lâmina foi colocada sobre a balança, Figura 11;



Figura 11 - Lâmina em cima da balança

7 – uma quantidade de 45 g da mistura foi adicionada e espalhada com uma espátula de plástico, Figura 12 e Figura 13, respectivamente; após esse procedimento, reservou-se o material;



Figura 12 - Pesagem do adesivo por lâmina



Figura 13 - Espalhamento do adesivo

8 – as etapas anteriores foram repetidas para outras três lâminas;

9 – as lâminas foram sobrepostas de maneira que a direção das fibras ficasse ortogonal em relação à lâmina imediatamente inferior, Figura 14;



Figura 14 - Sobreposição das lâminas

10 – o painel foi prensado a 110°C durante 8 minutos sob uma pressão específica de 1kgf/cm² (1MPa), Figura 15.



Figura 15 - Etapa de prensagem

3.3.2 Painéis compensados com o adesivo à base de fenol-formaldeído

A confecção de painéis compensados com o adesivo à base de fenol-formaldeído cumpriu as seguintes etapas:

1 – em um recipiente metálico foi pesada a quantidade de 461,40 g de resina, Figura 16;



Figura 16 - Pesagem da resina à base de fenol-formaldeído

- 2 – em um béquer de plástico foi pesada a quantidade de 69 g de água;
- 3 – em um béquer de plástico foi pesada a quantidade de 69 g de farinha de trigo;
- 4 – com o auxílio de uma batedeira, todos os ingredientes foram misturados durante 5 minutos, até que a mistura ficasse homogeneizada;
- 5 – uma lâmina foi colocada sobre a balança;
- 6 – uma quantidade de 45 g da mistura foi adicionada e espalhada com uma espátula de plástico; após esse procedimento, reservou-se o material;
- 7 - as etapas anteriores foram repetidas para outras três lâminas;
- 8 – as lâminas foram sobrepostas de maneira que a direção das fibras ficasse ortogonal em relação à lâmina imediatamente inferior;

9 – O painel foi prensado a 130°C durante 10 minutos sob a pressão específica de 1kgf/cm² (1MPa).

3.3.3 Painéis compensados com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona

Os equipamentos utilizados na preparação do adesivo de poliuretano estão demonstrados na Figura 17 e detalhados no Apêndice B.



Figura 17 - Materiais utilizados para a mistura do adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona

A confecção dos painéis compensados utilizando-se o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona com a gramatura de 180 g/m² obedeceu as seguintes etapas:

- 1 – uma quantidade de 100 g de pré-polímero foi pesada em um béquer de plástico;
- 2 - no mesmo recipiente, pesou-se 100 g de polioli, conforme demonstrado na Figura 18;



Figura 18 - Pesagem do pré-polímero e polioli

3 - com o auxílio de uma batedeira, os dois produtos foram misturados por aproximadamente 1 minuto, conforme Figura 19;



Figura 19 - Mistura do pré-polímero com o polioli com a batedeira

- 4 – em seguida, uma lâmina foi colocada sobre a balança;
- 5 – após, houve a adição de uma quantidade de 45 g da mistura (pré-polímero + polioliol) e o espalhamento com uma espátula de plástico. Este conjunto foi reservado para uso posterior;
- 6 – as etapas anteriores foram repetidas para outras três lâminas;
- 7 – as lâminas foram sobrepostas de tal maneira que a direção das fibras ficasse ortogonal em relação à lâmina imediatamente inferior;
- 8 – o painel foi prensado a 90°C durante 20 minutos sob uma pressão específica de 1kgf/cm² (1MPa).

A metodologia utilizada foi a mesma para as gramaturas de 160 g/m², 140 g/m² e 120 g/m², variando-se apenas as quantidades de pré-polímero e polioliol nas etapas 1 e 2 e a quantidade de adesivo por lâmina na etapa 5. As quantidades de pré-polímero e polioliol adicionadas para cada gramatura podem ser verificadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidades de pré-polímero e polioliol utilizadas na preparação de painéis com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona para as diferentes gramaturas

Gramatura (g/m ²)	Quantidade para mistura (g)		Quantidade por lâmina (g)
	Polioliol de óleo de mamona	Pré-polímero	
180	100	100	45
160	85	85	40
140	75	75	35
120	65	65	30

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos realizados foram os de Flexão estática (EN-310:1993) e de Cisalhamento por tração da linha de colagem (EN-314-1:1996/EN-314-2:1996). Os corpos de prova foram cortados na marcenaria da Universidade Federal do Paraná, Figura 20, a partir dos painéis compensados fabricados, Figura 21 e Figura 22. As dimensões aproximadas dos corpos de prova destinados aos ensaios de cisalhamento e flexão estão demonstradas na Figura 23 e Figura 24, respectivamente.



Figura 20 - Corte dos corpos de prova em marcenaria



Figura 21 - Corpos de prova para ensaios de flexão



Figura 22 - Corpos de prova para ensaios de cisalhamento

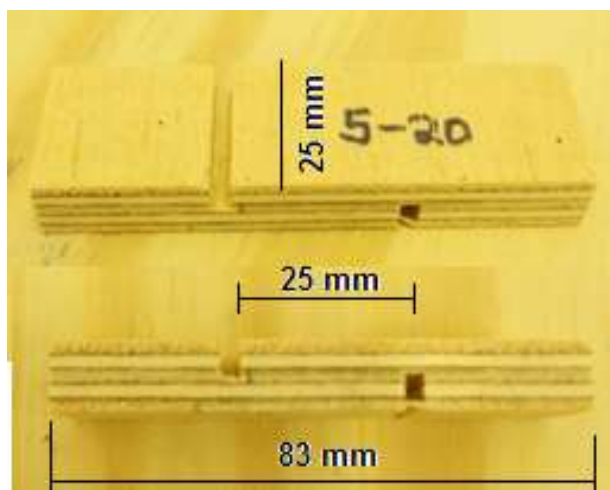


Figura 23 - Dimensões dos corpos de prova para ensaios de cisalhamento

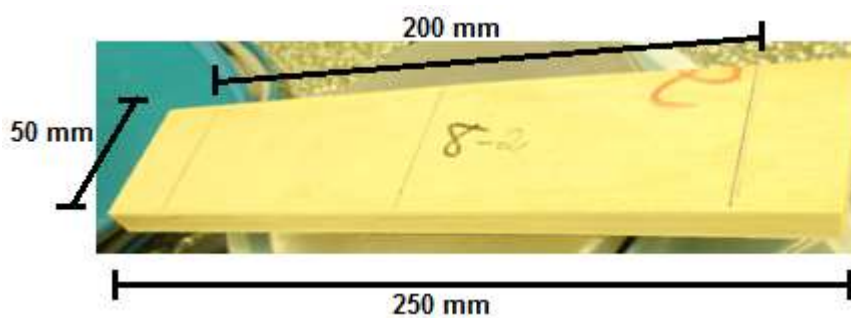


Figura 24 - Dimensões dos corpos de prova para ensaios de flexão

O teste de cisalhamento serve para determinar a qualidade da linha de cola (PIO, 1996) e fornece a resistência ao cisalhamento (PRATA, 2006). O ensaio de flexão estática é importante para a determinação das características mecânicas do

painel de madeira. Através dele, são obtidos dois parâmetros: o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) (LIMA; PIO, 2007).

3.4.1 Medição dos corpos de prova

Todos os corpos de prova foram medidos antes dos ensaios terem início, sendo que os destinados aos ensaios de flexão foram medidos sua espessura, sua largura e seu peso, com um paquímetro.

Os destinados aos ensaios de cisalhamento, foram medidos, com um paquímetro, a distância entre os vãos e a largura, Figura 25, Figura 26, respectivamente para gerar a área cisalhada.



Figura 25 - Distância entre os vãos



Figura 26 - Largura no meio do corpo de prova

3.4.2 Ensaio de flexão estática

Os ensaios de flexão estática paralela e perpendicular às fibras foram realizados empregando-se a máquina EMIC, modelo DL 2000, com capacidade máxima de 20 kN, Figura 27. A direção das fibras das lâminas de capa e contracapa nos corpos de prova diferenciou cada um dos ensaios, conforme ilustrado na Figura 28; a velocidade da máquina (10 mm/min. para flexão paralela às fibras e 13 mm/min. para flexão perpendicular às fibras). A norma recomenda que a ruptura do corpo de prova ocorra de 30 a 90 segundos, ficando o mais próximo possível de 60 segundos. Através destes ensaios foram obtidos tanto o módulo de ruptura (MOR) quanto o módulo de elasticidade (MOE) para cada corpo de prova.



Figura 27 - Ensaio de flexão

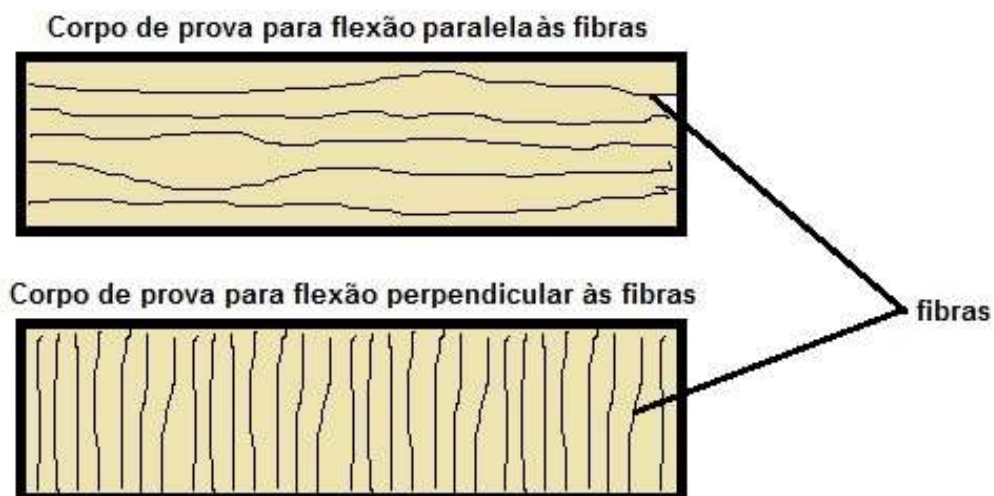


Figura 28 - Esquema dos corpos de prova para os ensaios de flexão

A marcação do meio dos corpos de prova e da distância entre os apoios (20 cm) foi realizada antes de proceder aos ensaios de flexão, Figura 29.



Figura 29 - Delimitação de distâncias para os ensaios de flexão

3.4.3 Ensaio de cisalhamento

Os ensaios de cisalhamento foram realizados, com a utilização da máquina EMIC, modelo DL 2000, com capacidade máxima de 20 kN, com velocidade de 6 mm/min., conforme se observa na Figura 30.



Figura 30 - Ensaio de cisalhamento

Os corpos de prova de cada painel confeccionado com os tipos de adesivos e gramaturas foram submetidos a pré-tratamentos para a realização dos ensaios de cisalhamento:

- **Tratamento seco:** foi realizado cisalhamento a seco nos corpos de prova.
- **Tratamento de água fria:** os corpos de prova passaram por imersão de 24 horas em água fria e em seguida foram ensaiados.
- **Tratamento de fervura:** os corpos de prova foram colocados para ferver durante 72 horas e ensaiados após 1 hora de resfriamento.
- **Tratamento de ciclo de fervura:** os corpos de prova ferveram por 4 horas. Após este período, foram retirados e colocados em estufa por 16-20hs a 60 °C. Em seguida, foram levados novamente à fervura por mais 4 horas, retirados, resfriados por 1 hora em água fria e ensaiados.

Os pré-tratamentos simulam condições críticas de umidade e temperatura. Dessa forma, é possível verificar como a resistência ao cisalhamento varia em

função dessas condições, contribuindo para se determinar a correta aplicação do painel.

Cinco corpos de prova por painel foram utilizados para cada pré-tratamento, sendo que os painéis confeccionados com o adesivo à base de uréia-formaldeído não passaram pelos tratamentos de fervura e ciclo de fervura, Figura 31. Como ele é destinado ao uso interno, não é necessário verificar as condições que seriam aplicadas para adesivos de uso externo, como é o caso do fenol-formaldeído e do adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona.



Figura 31 - Separação dos corpos de prova por painel para o pré-tratamento de fervura

Através destes ensaios obteve-se a carga máxima para cada corpo de prova. Com este valor, é possível calcular a resistência ao cisalhamento através da equação:

$$\text{Resistência ao cisalhamento} = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Largura} \times \text{Distância entre os sulcos}} \quad (4)$$

3.4.4 Análise estatística dos dados

Os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística, sendo efetuados os seguintes testes: teste de Grubb's para avaliar a ocorrência de *outliers*,

ou seja, erros grosseiros ou sistemáticos que precisam ser detectados e eliminados; teste de Shapiro Wilk's para avaliar a normalidade de dados, isto é, para verificar a aderência dos dados à distribuição normal; teste de Bartlett para verificar a homogeneidade de variância, pois os tratamentos individuais devem possuir homogeneidade para as variâncias a fim de possibilitar a realização da análise de variância (ANOVA); e finalmente a ANOVA que permite a identificação de variações entre as médias populacionais em função de diversas causas, atuando simultaneamente sobre elementos da população. Quando rejeitada a hipótese de igualdade, foi efetuado o teste de comparação de médias de Tukey. Todos os testes foram efetuados no programa *Statgraphics Centurion XV*, a 5% de probabilidade (TRIANOSKI, 2010; TRIANOSKI, 2012).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. Inicialmente, é apresentado e discutido o efeito do tipo de adesivo utilizado na confecção dos painéis compensados com gramatura de 180 g/m², comparando-se as resistências ao cisalhamento da linha de cola e à flexão estática (módulos de elasticidade e de ruptura). Após, discute-se o efeito da variação de gramatura nos painéis confeccionados com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona com relação às resistências citadas anteriormente.

É importante destacar que não houve diferença estatística com relação à densidade aparente dos painéis a um teor de umidade de 12% (ME12%), Figura 32 e Figura 33, ou seja, as lâminas escolhidas para compor os painéis eram iguais em termos de qualidade. Os resultados acompanhados da mesma letra, são estatisticamente iguais; caso contrário, são estatisticamente diferentes.

Isto significa que a influência da massa específica foi eliminada, principalmente sobre os resultados de flexão estática.

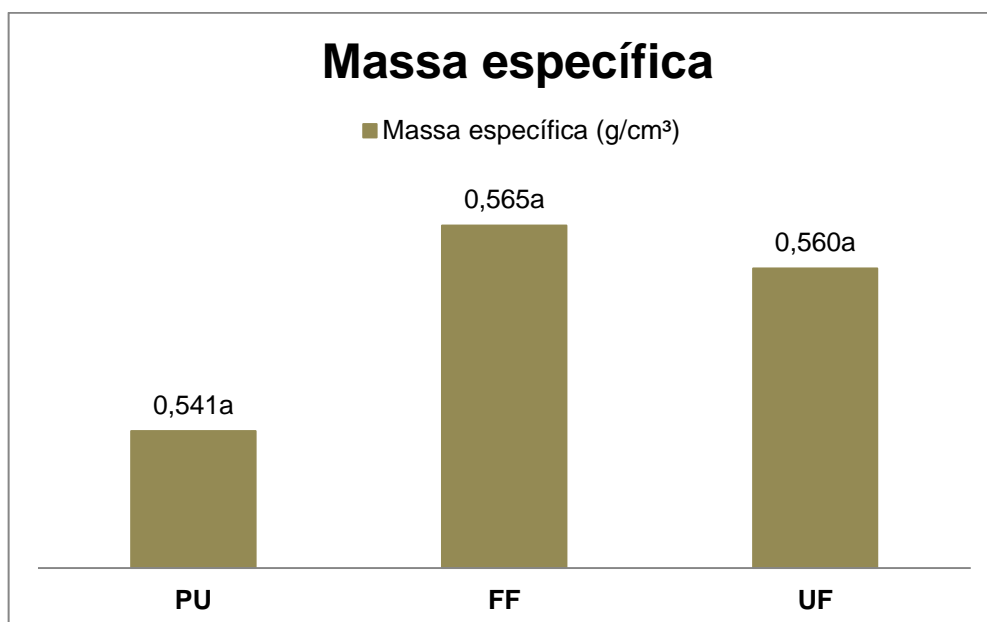


Figura 32 - Massa específica dos painéis confeccionados com o adesivo de poliuretano e com os adesivos à base de formaldeído

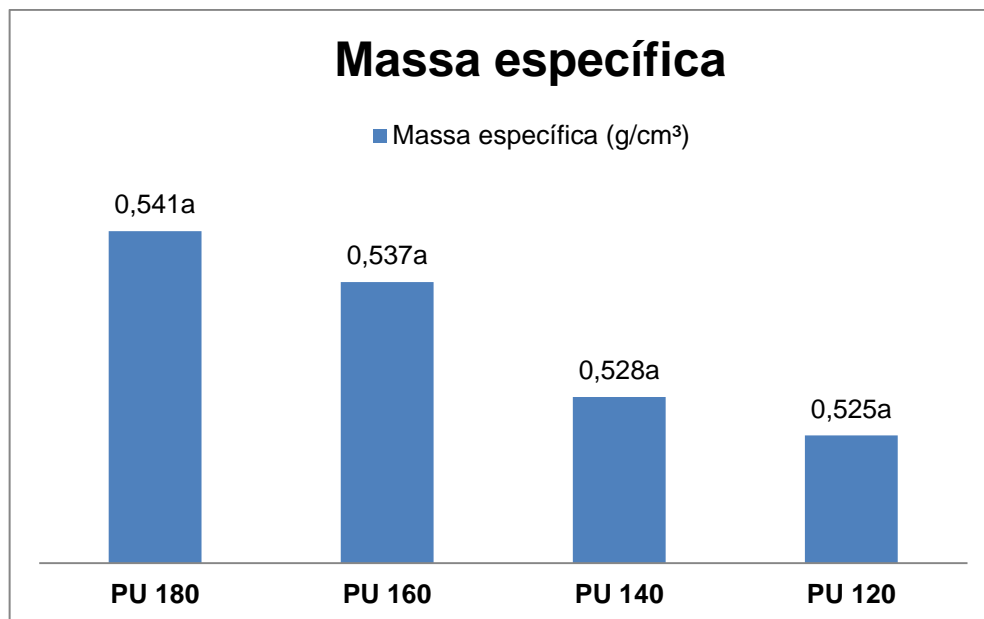


Figura 33 - Massa específica dos painéis confeccionados com o adesivo de poliuretano a diferentes gramaturas

Rezende *et. al.* (2008) encontrou, para madeiras de *Pinus caribaea hondurensis*, valores médios de densidade aparente em 12% de umidade entre 0,510 g/cm³ a 0,560 g/cm³. Uma maior densidade da madeira pode influenciar na formação da ligação adesiva entre as lâminas, em razão da maior dificuldade de penetração do adesivo, além de gerar maior pressão interna de vapor durante a prensagem a quente. Isto contribui para a redução da taxa de polimerização da resina (IWAKIRI *et. al.*, 2007).

4.1 EFEITO DO ADESIVO

Os valores médios encontrados de resistência ao cisalhamento (RLC) dos painéis, bem como a porcentagem de falha para os três tipos de adesivo são mostrados na Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Tabela 3 (Apêndice C). Resultados acompanhados da mesma letra, são estatisticamente iguais; caso contrário, são estatisticamente diferentes.

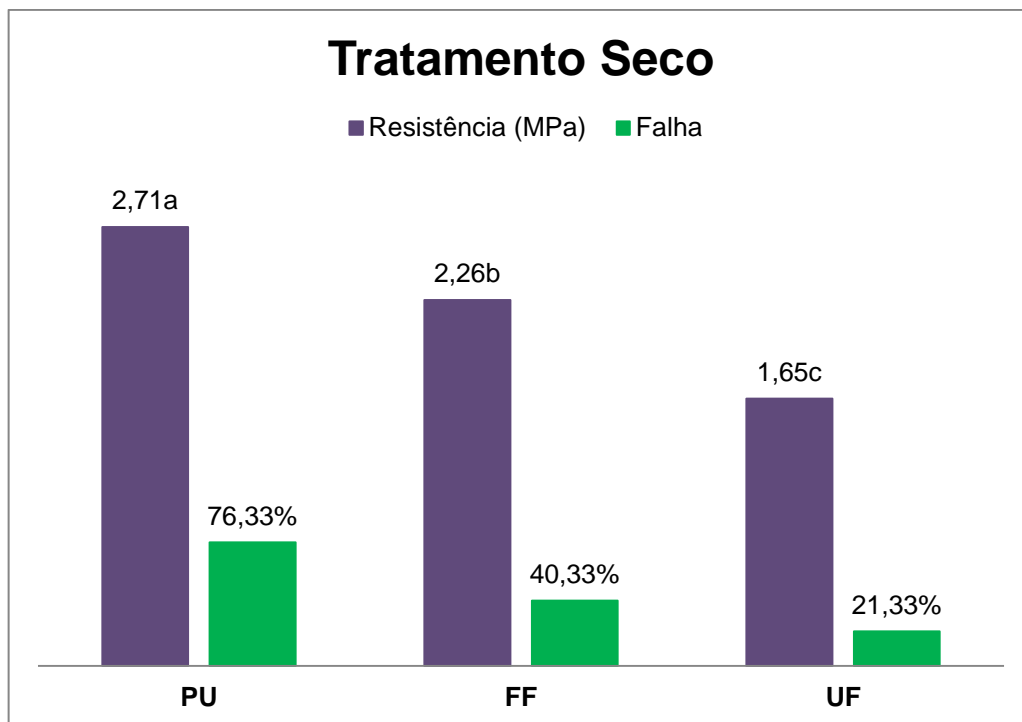


Figura 34 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento seco para o adesivo de poliuretano e os à base de formaldeído

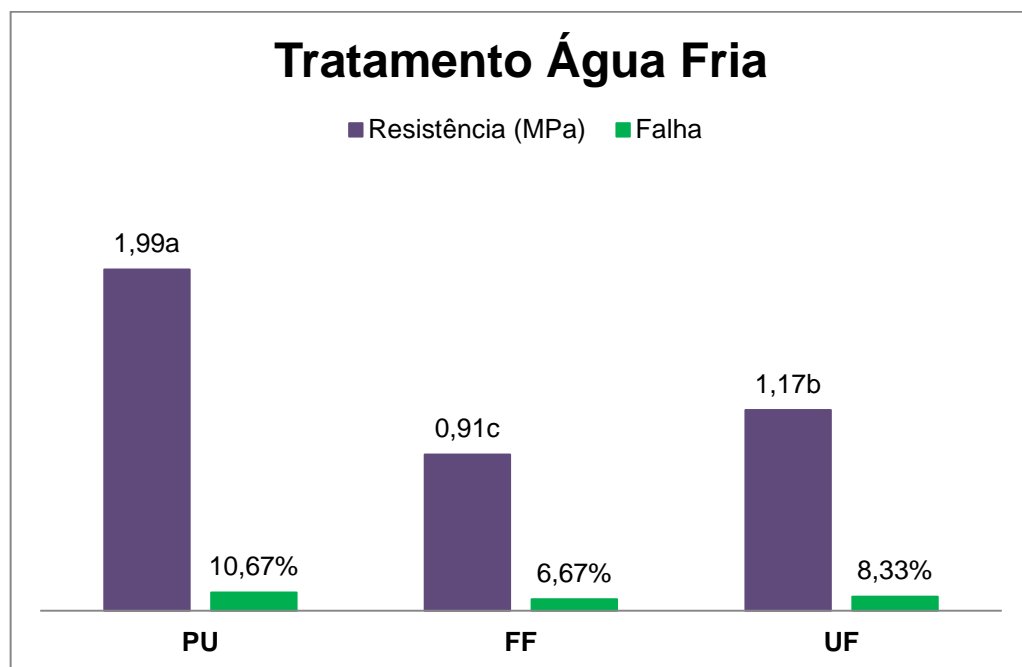


Figura 35 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento água fria para o adesivo de poliuretano e os à base de formaldeído

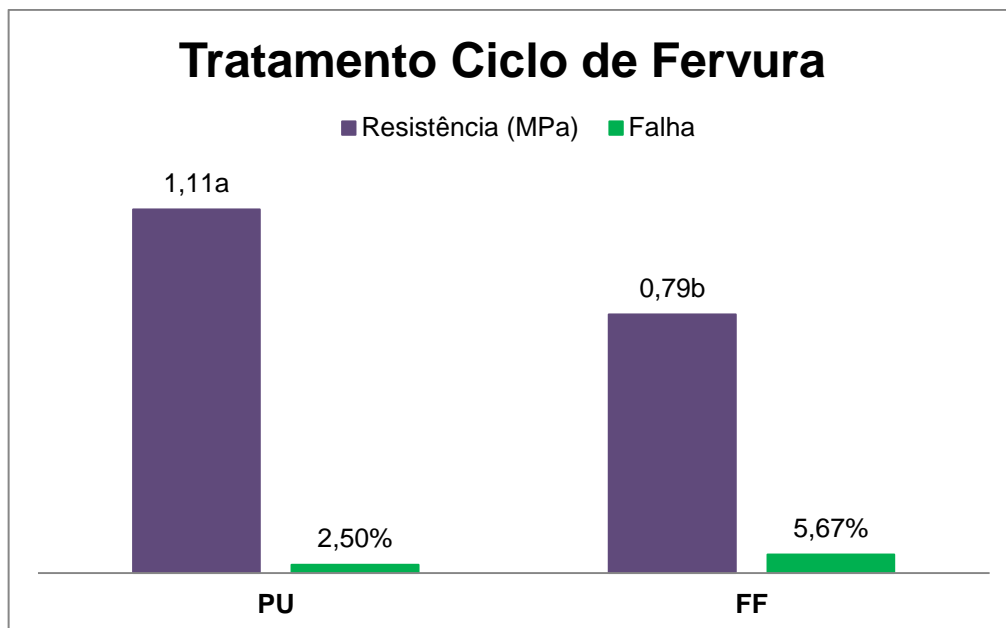


Figura 36 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento ciclo de fervura para o adesivo de poliuretano e o à base de fenol-formaldeído

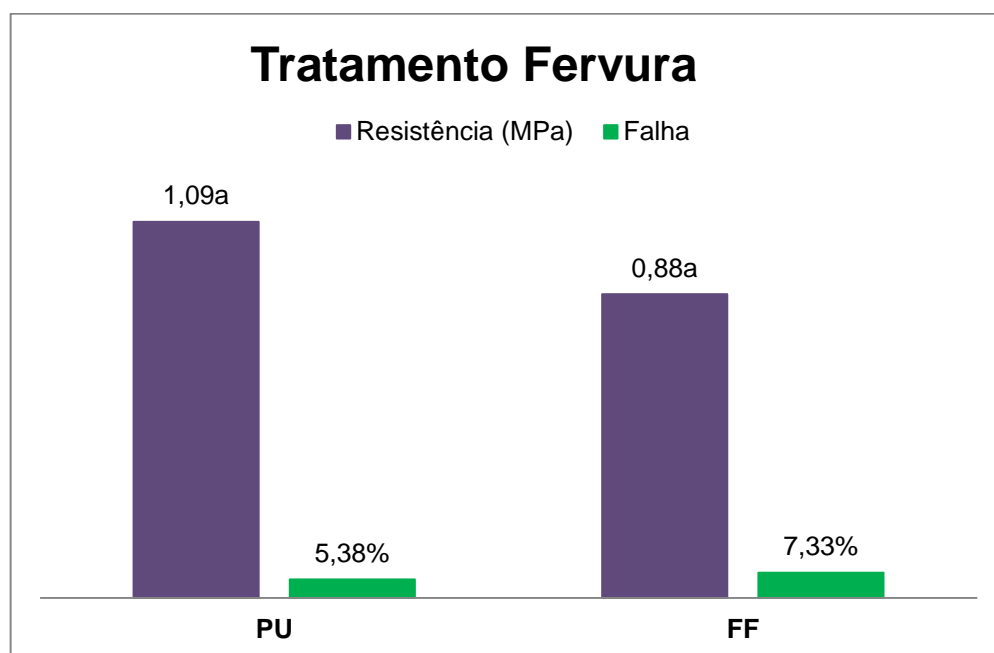


Figura 37 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento fervura para o adesivo de poliuretano e o à base de fenol-formaldeído

Os valores referentes ao adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona foram superiores em relação aos demais, como é possível se verificar em todos os casos. Este fato demonstra que este adesivo é superior em resistência se comparado aos adesivos à base de formaldeído. Todos os valores médios de

resistência à linha de cola obtidos para o adesivo de poliuretano atendem aos requisitos mínimos exigidos pela norma EN 314 (1996), de 1,0 MPa.

É importante destacar que o adesivo à base de fenol-formaldeído é do tipo estrutural para uso externo, a uréia-formaldeído é estrutural para uso interno e o adesivo de poliuretano é considerado um semi-estrutural (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Os adesivos semi-estruturais possuem limitações para uso externo em virtude de sua menor resistência à água em relação aos estruturais. Porém, os resultados apresentados para o tratamento fervura, que simula condições críticas de umidade e temperatura, indicam que não houve diferença significativa de resistência do adesivo de poliuretano em relação ao adesivo à base de fenol-formaldeído. Isso mostra que mesmo sendo semi-estrutural, pode-se considerar que o adesivo de poliuretano possui um desempenho melhor em relação a um adesivo estrutural destinado ao uso externo.

A falha se refere à porcentagem de madeira remanescente no local da fissura. Uma porcentagem elevada indica que a fissura ocorreu na madeira e não no ponto de contato entre o adesivo e a madeira. Isto significa que o adesivo é mais resistente que a madeira. Na Figura 38 são mostrados dois exemplos de falha (Abrahão *et. al.*, 2003)

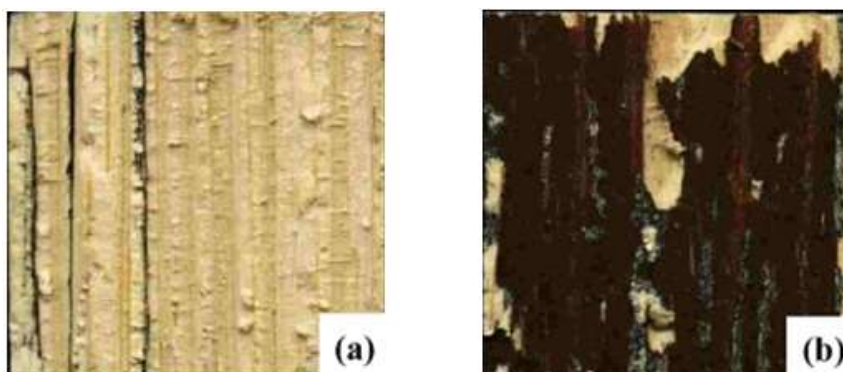


Figura 38 - Corpos de prova com alta (a) e baixa (b) porcentagem de falha da madeira
Fonte: Adaptado de Abrahão *et. al.*, 2003

As porcentagens de falha para cada tipo de adesivo foram apresentadas na Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37. Com relação ao tratamento seco e água fria para o adesivo de poliuretano observa-se uma maior porcentagem de falha, sendo que esse percentual diminui em relação ao adesivo à base de fenol-formaldeído para os tratamentos de ciclo e fervura.

A condição de alguns corpos de prova contendo o adesivo de poliuretano é mostrada na Figura 39. Os pré-tratamentos de ciclo e fervura acarretaram uma diminuição de resistência do adesivo, o que mostra que a ligação adesiva não foi resistente o suficiente para manter as lâminas coladas. Isto pode ser devido a diversos fatores, tais como: metodologia de espalhamento não homogênea do adesivo nas lâminas no momento de confecção do painel; proporção de pré-polímero e poliálcool inadequada para compor o adesivo de poliuretano; variáveis de prensagem (tempo, temperatura e pressão) inadequadas; escorrimento do adesivo pelas bordas do painel no momento da prensagem, o que significa uma menor quantidade efetiva de adesivo utilizada na colagem das lâminas, entre outros fatores.



Figura 39 - Alguns corpos de prova de cisalhamento após tratamento de ciclo e fervura

Iwakiri *et. al.* (2001) encontrou, para chapas de madeira compensada de *Pinus caribaea* produzidas com adesivos à base de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído, valores médios de RLC em cisalhamento da linha de cola. Para o adesivo à base de uréia-formaldeído, o valor médio de RLC encontrado foi 1,28 MPa para o tratamento seco e 0,75 MPa para o tratamento de água fria. Para o adesivo à base de fenol-formaldeído, os valores médios de RLC foram de 2,34 MPa para o tratamento seco e 1,45 MPa para o tratamento de fervura. Esses valores se aproximam dos resultados obtidos neste trabalho.

Os resultados médios de flexão estática dos painéis compensados produzidos com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona, à base de

fenol-formaldeído e uréia-formaldeído a 180 g/m² são mostrados na Figura 40 e na Figura 41 (Apêndice C - Tabela 4 e Tabela 5).

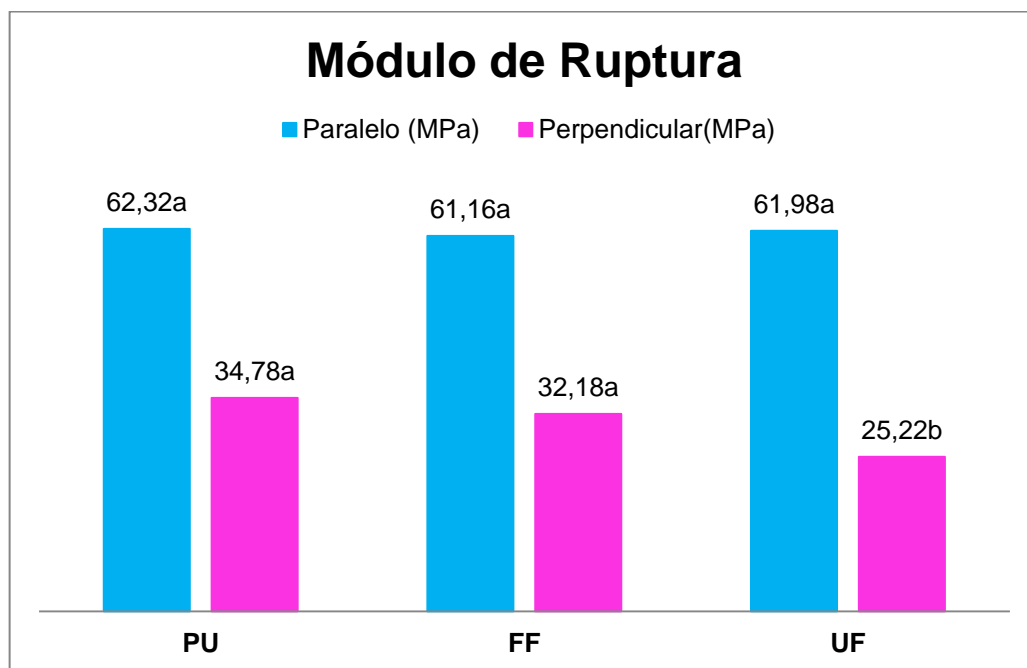


Figura 40 - Resultados de módulo de ruptura (MOR) obtidos com os ensaios de flexão estática para os diferentes adesivos

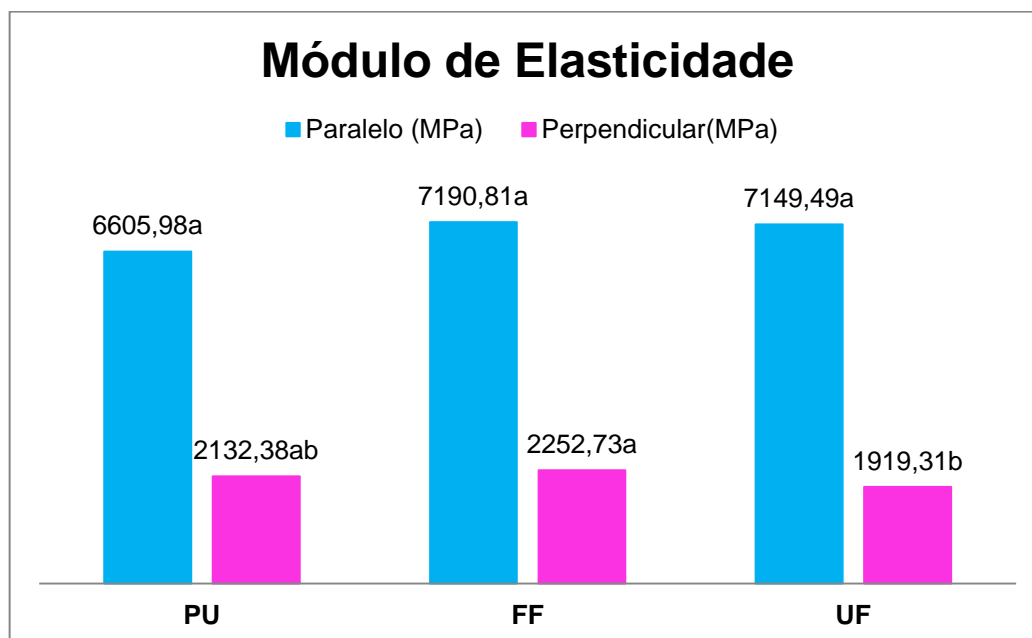


Figura 41 - Resultados de módulo de elasticidade (MOE) obtidos com ensaios de flexão estática para os diferentes adesivos

No que diz respeito à flexão estática paralela às fibras, percebe-se que tanto o módulo de ruptura, quanto o módulo de elasticidade não apresentaram diferenças

significativas entre os adesivos avaliados. Os módulos de elasticidade sensivelmente menores para o adesivo de poliuretano sugerem que ele é capaz de se deformar mais em relação aos outros dois adesivos.

Com relação à flexão estática perpendicular às fibras, nota-se que os resultados para os adesivos à base de fenol-formaldeído e poliuretano são estatisticamente iguais, ou seja, possuem a mesma resistência. No presente caso, para o adesivo à base de uréia-formaldeído, a resistência foi estatisticamente inferior aos outros dois adesivos.

O ensaio de flexão perpendicular às fibras normalmente apresenta menor resistência mecânica a qual é justificada pela disposição das lâminas de capa e contrapa. Com relação ao MOE para este ensaio, verifica-se que o adesivo de poliuretano apresentou valores médios absolutos ligeiramente inferiores ao adesivo à base de fenol-formaldeído; no entanto, não foi observada diferença estatística significativa. Além disso, em relação ao adesivo à base de uréia-formaldeído, o adesivo de poliuretano apresentou valores médios ligeiramente superiores; no entanto, também não se constatou diferença estatística significativa.

Iwakiri *et. al.* (2001) encontrou para chapas de madeira compensada de *Pinus caribaea* produzidos com adesivos à base de uréia-formaldeído e fenol-formaldeído, valores médios de MOR e MOE em flexão estática. Para o adesivo à base de uréia-formaldeído o valor médio de MOR encontrado foi 34,80 MPa e para o MOE, 3.877,43 MPa. Para o adesivo à base de fenol-formaldeído, os valores médios de MOR e MOE foram de 27,50 MPa e 4.158,40 MPa. Os painéis foram confeccionados com 5 lâminas, gramatura de 350 g/m² (UF) e 380 g/m² (FF), temperatura de 100 °C (UF) e 140 °C (FF), tempo de prensagem de 11 minutos (UF) e 9 minutos (FF) e pressão de 1 MPa para os dois tipos de adesivo.

Iwakiri *et. al.* (2002) encontrou, para painéis compensados de *Pinus taeda* e *Pinus oocarpa* produzidos com adesivos à base de uréia-formaldeído, valores médios de MOR e MOE entre 65-78 MPa e 8.650 – 11.785 MPa, respectivamente.

Os resultados obtidos neste trabalho se aproximam destes valores, sendo que as variações podem ocorrer dependendo da espécie de madeira, da gramatura escolhida, do tipo de adesivo, bem como das condições ambientais em que foram produzidos os painéis compensados.

4.2 EFEITO DA GRAMATURA

As indústrias, em geral, encontram problemas na linha de cola em virtude da influência da quantidade de cola na fabricação de compensados. Esta influência está ligada ao teor de umidade, que afeta diretamente na resistência da junta e na estabilidade do produto colado. Algumas madeiras possuem poros grandes e absorvem mais cola em função da viscosidade do adesivo (LIMA *et al.*, 2011).

A variação de gramatura é necessária para se aperfeiçoar o processo industrial, levando-se em consideração o custo elevado da matéria-prima que compõe o adesivo, bem como o processo técnico de aplicação de determinada quantidade de adesivo, g/m², de tal forma que se utilize o mínimo de adesivo para produzir uma resistência similar à desejada.

Conforme verificado no item 4.1, não houve diminuição de resistência para a gramatura de 180 g/m² do painel compensado confeccionado com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona. Cumpre esclarecer que se optou pela redução de gramatura afim de se determinar a gramatura ideal a ser aplicada para esse tipo de adesivo. Os resultados médios de resistência ao cisalhamento dos painéis compensados produzidos com o adesivo de poliuretano são mostrados na Figura 42, Figura 43, Figura 44, Figura 45 e Tabela 6 (Apêndice C).

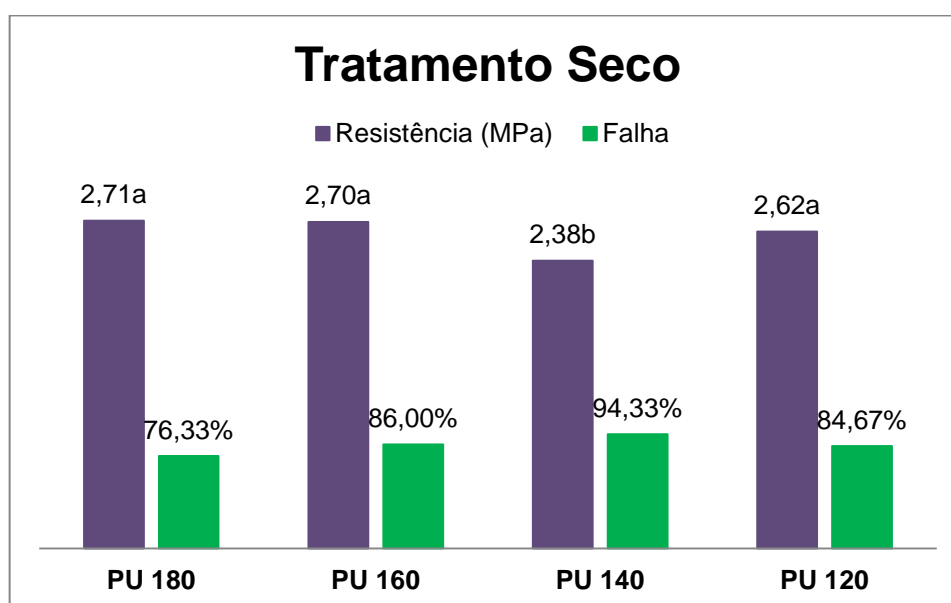


Figura 42 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento seco para o adesivo de poliuretano nas diferentes gramaturas utilizadas

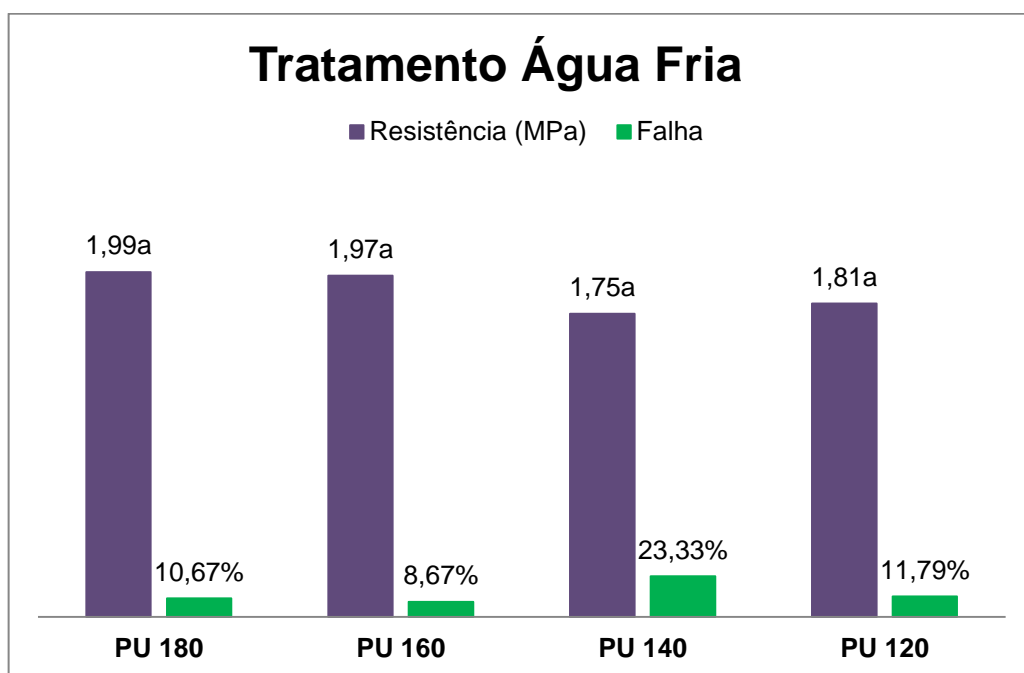


Figura 43 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento água fria para o adesivo de poliuretano nas diferentes gramaturas utilizadas

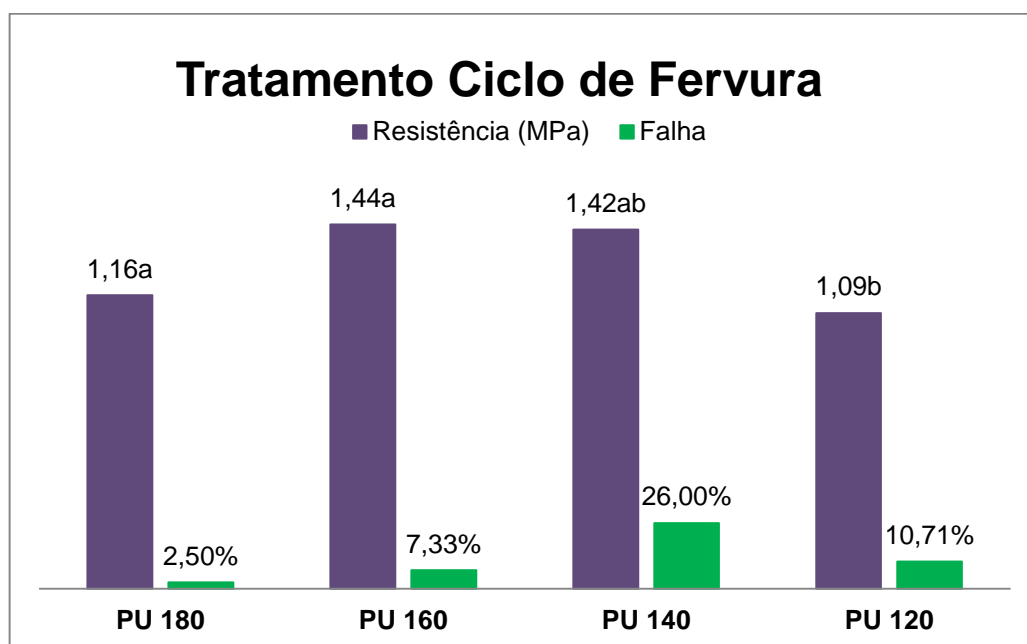


Figura 44 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento ciclo de fervura para o adesivo de poliuretano nas diferentes gramaturas utilizadas

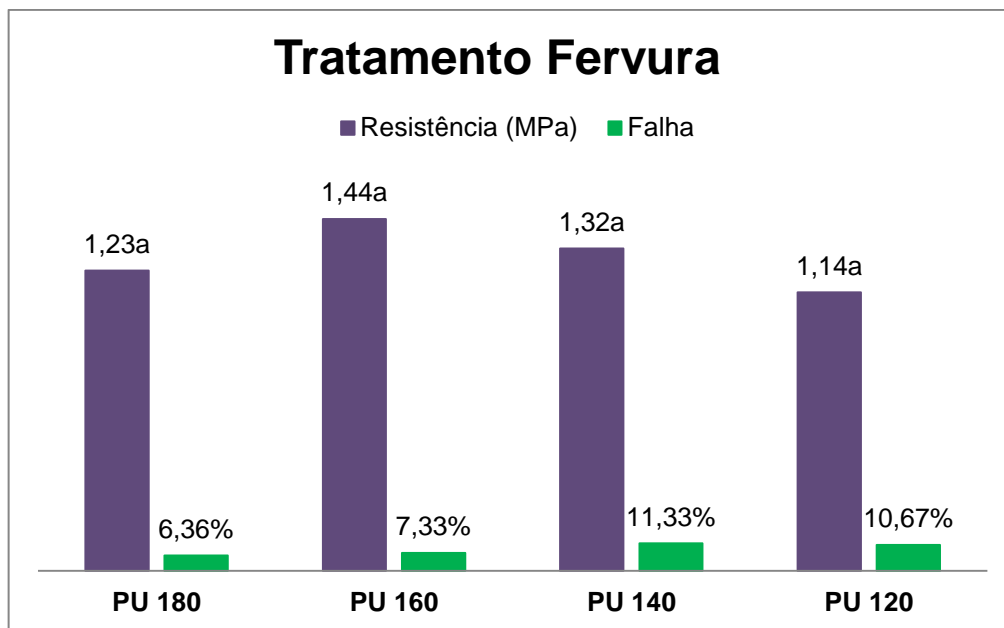


Figura 45 - Resultados do ensaio de cisalhamento referente ao tratamento fervura para o adesivo de poliuretano nas diferentes gramaturas utilizadas

Diferenças estatísticas foram constatadas nos tratamentos seco e ciclo de fervura. Todas as gramaturas apresentaram valores médios de tensões de cisalhamento superiores ao valor mínimo de 1,0 MPa, em conformidade com a norma EN 314-2:1996. Por esta razão, é possível afirmar que a gramatura de melhor desempenho foi a de 120 g/m².

Com base nos requisitos da norma europeia, os painéis compensados produzidos com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona nas gramaturas de 180 g/m², 160 g/m², 140 g/m², 120 g/m² nas condições utilizadas para este trabalho, podem ser indicados para uso interno e externo.

Os resultados médios de flexão estática estão demonstrados na Figura 46 e Figura 47 (Tabela 7 e Tabela 8 do Apêndice C) para as gramaturas de 180 g/m², 160 g/m², 140 g/m² e 120 g/m².

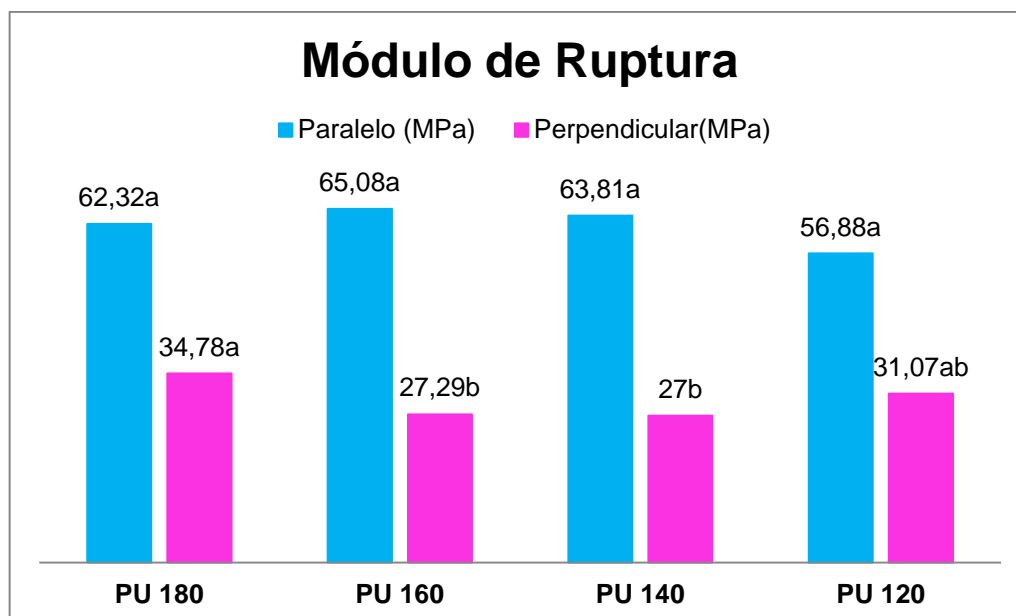


Figura 46 - Resultados de módulo de ruptura (MOR) obtidos com os ensaios de flexão estática para as diferentes gramaturas do adesivo de poliuretano

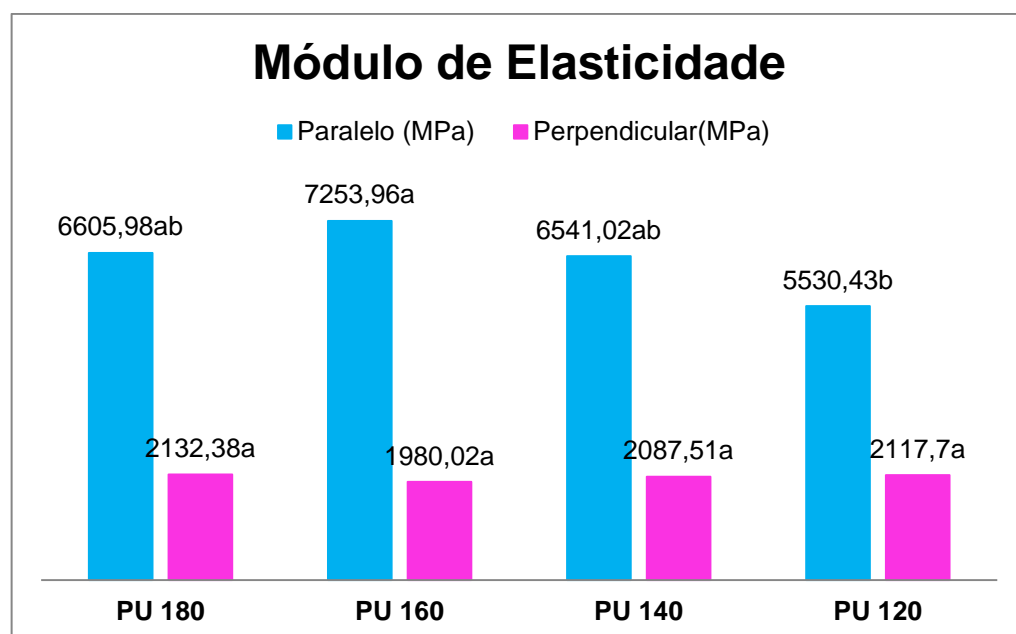


Figura 47 - Resultados de módulo de elasticidade (MOE) obtidos com ensaios de flexão estática para as diferentes gramaturas do adesivo de poliuretano

Com relação ao MOR, observa-se através dos resultados que houve redução em termos de valores médios. Porém, estatisticamente todas as gramaturas são iguais.

A massa específica da madeira foi igual em todos os tratamentos, conforme citado anteriormente; logo, a seleção de lâminas adequadas eliminou a influência da massa específica sobre o MOR e o MOE nos ensaios de flexão estática.

Através da análise estatística pode-se perceber que não houve variações de resistência entre as diferentes gramaturas. Isto significa que um painel compensado produzido com o adesivo de poliuretano a 180 g/m² poderá ter resistência igual a um mesmo painel produzido a 120 g/m².

Sob o ponto de vista econômico, essa constatação é de fundamental importância, uma vez que a redução da quantidade de adesivo na confecção do painel não reduziu os valores de resistência à flexão. Além disso, a massa específica foi estatisticamente igual em todos os tratamentos. Logo, a seleção de lâminas foi adequada, permitindo a eliminação da influência desta variável sobre o MOR e o MOE.

Campos *et. al.* (2009) encontrou, para painéis compensados de *Pinus sp.* produzidos com adesivo poliuretano bicomponente à base de mamona utilizando gramatura de 400 g/m², prensagem a 1,5 MPa à temperatura de 60°C durante 15 minutos, MOR variando de 39 a 56 MPa e MOE de 10.000 a 15.322 MPa para a flexão estática.

Valores médios de massa específica a 12% de umidade, resistência da linha de cola e flexão estática foram publicados no ano de 2007 pela ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. Eles representam resultados obtidos em ensaios de caracterização do produto (*Initial Type Testing- ITT*, de acordo com a Norma EN-789 e a EM série 300) e foram realizados pelas indústrias que participam do Programa Nacional de Qualidade da Madeira (PNQM) e *CE Marking*. Os painéis compensados ensaiados utilizavam lâminas de *Pinus sp.* coladas com adesivo fenólico, destinados ao uso externo, aplicação estrutural, não lixados e com qualidade C+/C – nomenclatura comercial. A massa específica média encontrada foi de 0,552 g/cm³ (mín: 0,476 g/cm³; máx: 0,641 g/cm³).

Os valores médios obtidos para painéis compensados de 5 lâminas (espessura = 12 mm) de resistência à linha de cola foram 1,25 MPa (mín: 0,83 MPa; máx: 1,71 MPa) para o tratamento ciclo de fervura; e 1,07 (mín: 0,68 MPa; máx: 1,47 MPa) para o tratamento fervura. Os resultados de resistência à linha de cola obtidos neste trabalho para painéis compensados confeccionados com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona estão dentro desses intervalos.

Com relação à flexão estática, valores médios para os módulos de ruptura (MOR) paralelo e perpendicular às fibras foram 45,36 MPa (mín: 27,38 MPa; máx:

63,58 MPa) e 32,05 MPa (mín: 20,58 MPa; máx: 45,27 MPa), respectivamente. Os valores médios para os módulos de elasticidade (MOE) paralelo e perpendicular às fibras foram 5.140 MPa (mín: 3.101 MPa; máx: 7.063 MPa) e 2.591 MPa (mín: 1.763 MPa; máx: 4.047 MPa), respectivamente. Os resultados de flexão estática obtidos neste trabalho para painéis compensados confeccionados com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona estão dentro desses intervalos.

Sendo assim, é possível afirmar que o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona pode substituir o adesivo à base de fenol-formaldeído, que é um adesivo estrutural indicado para uso externo, quando utilizado em painéis compensados.

As variações ocorridas nos resultados analisados podem estar relacionadas com a metodologia de espalhamento empregada e com a qualidade da lâmina utilizada. Além disso, para as gramaturas de 180 g/m² e 160 g/m² observou-se o escorrimento do adesivo pelas bordas do painel, o que significa que nem todo o adesivo aplicado foi efetivamente aproveitado no processo de colagem do painel, influenciando, portanto, nos resultados obtidos neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados deste trabalho foi possível concluir, através dos ensaios de cisalhamento por tração da linha de colagem, que em relação aos adesivos contendo resinas à base de formaldeído, o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona possui uma resistência superior. A variação de gramatura também não produziu uma redução de resistência ao cisalhamento.

Os resultados dos ensaios de flexão estática para a gramatura de 180 g/m² mostraram que não houve redução de resistência nos painéis compensados fabricados com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona, comparado aos adesivos à base de formaldeído.

A variação de gramatura nos painéis compensados fabricados com o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona (180 g/m², 160 g/m², 140 g/m² e 120 g/m²), também não produziu redução acentuada de resistência com a diminuição da gramatura, para os ensaios de flexão estática.

Os valores obtidos neste trabalho, em geral, foram similares, quando comparados com os valores encontrados na literatura. Nesse contexto, pode-se afirmar que o adesivo de poliuretano derivado de óleo de mamona possui resistência similar aos adesivos contendo resinas à base de formaldeído.

Finalmente conclui-se que o comportamento mecânico do adesivo derivado de óleo de mamona foi avaliado através dos ensaios de flexão estática e cisalhamento por tração da linha de colagem e comparado com os adesivos comerciais a base de formaldeído. Verificou-se que a substituição destes adesivos pelo poliuretano derivado de óleo de mamona é viável para uso interno e externo. Além disso, também pode-se concluir que a gramatura de melhor desempenho para este adesivo foi de 120 g/m².

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma sugestão seria a adoção da metodologia empregada neste trabalho, em condições idênticas, utilizando-se painéis compensados fabricados com o adesivo derivado de óleo de mamona a gramaturas inferiores, a fim de se obter a gramatura ideal para esse tipo de adesivo.

Recomenda-se, ainda, uma análise mais detalhada, sobre o que ocorre com o adesivo durante os pré-tratamentos de ciclo e fervura nos corpos de prova de cisalhamento. Isto possibilitaria determinar a correta razão pela qual alguns destes corpos de prova não resistiram a esses pré-tratamentos.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, Christovão Pereira; VARELLA, CARLOS A.A.; PINTO, Francisco A; KHOURY JUNIOR, Joseph K.. **Quantificação da falha na madeira em juntas coladas utilizando técnicas de visão artificial**. R. Árvore, Viçosa, v.27, n.1, p. 71-78, 2003.
- ALBUQUERQUE, Carlos Eduardo Camargo de; FIQUEIREDO, João Vicente de. **Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos**. Floresta e Ambiente. Vol. 7, n.1, p.158-166. Rio de Janeiro, 2000.
- ALVIM, Débora Souza; GATTI, Luciana Vanni; SANTOS, Maria Helena dos; YAMAZAKI, Amélia. **Estudos dos compostos orgânicos voláteis precursores de ozônio na cidade de São Paulo**. Eng Sanit Ambient. Vol.16, nº2, 189-196. São Paulo, 2011. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/esa/v16n2/v16n2a13.pdf>>
- AZEVEDO, Elaine Cristina. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado de óleo de mamona**. Curitiba, 2009. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/tese/034.pdf>>
- BOLOGNESI, Lúcio. **Quantificação de formaldeído em extrato aquoso obtido da emissão de painéis de madeira por espectrofotometria acoplada à injeção em fluxo**. Curitiba, 2010. Disponível em: <
<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/26473/Dissertacao%20Mestrado%20Lucio%20Bolognesi%202010.pdf?sequence=1>>
- BROCKMANN, Walter; GEIH, Ludwig; KLINGEN, Jorgen; SCHRODER, Bernhard. **The historical development of adhesive bonding**. Adhesive bonding: materials, applications and technology. Editora Winheim. 2009.
- BURGER, Luiza Maria; RICHTER, Hans Georg. **Anatomia da madeira**. Editora Nobel. São Paulo, 2011.
- CAMPOS, C.I.; LAHR, F.A.R. **Pinus e eucalipto para produção de painéis**. Revista da madeira. Edição nº 103. 2007.
- CAMPOS, Cristiane Inácio; MORAIS, Rafael Diogo Vasconcelos; NASCIMENTO, Maria de Fátima. **Caracterização físico-mecânica de painéis de madeira compensada produzidos com *Pinus sp.* e resina poliuretana bi-componente**. Revista Madeira, Arquitetura & Engenharia, São Carlos, ano 10, n.24, p. 37-50, 2009. Disponível em: < http://madeira.set.eesc.usp.br/article/viewFile/166/pdf_182>

CANGEMI, J. M.; CLARO NETO, S.; SANTOS, A. M. **Biodegradation: an alternative for minimizing the impacts from plastic residues**. Química nova na escola, BRASIL, v. 22, p. 17-21, 2006.

COGNARD, Philippe. **Handbook of adhesives and sealants, volume 1: basic concepts and high tech bonding**. Editora Elsevier. Versailles, 2005.

COHEN, Yoram. **Volatile organic compounds in the environment: a multimedia perspective**. WANG, W.; SCHNOOR, J.; DOI, J. Volatile organic compounds in the environment. ASTM STP 1261, , Eds., American Society for Testing and Materials, 1996, pp.7-32. Disponível em:< <http://209.195.157.104/DOWNLOAD/STP1261-EB.1485618-1.pdf>>

DIAS, Fabrício Moura. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. São Carlos, 2005.

DIAS, Fabrício Moura; LAHR, Francisco Antonio Rocco. **Alternative castor oil-based polyurethane adhesive used in the production of plywood**. Materials Research, Vol.7, n.3, p.413-420, 2004. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392004000300007&script=sci_arttext>

EBNESAJJAD, Sina. **Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing**. Surface tension and its measurement. Editora William Andrew/Elsevier. Amsterdam, 2011.

ENVIRONNEMENT CANADA. **Règlement limitant la concentration en composés organiques volatils (COV) des produits de finition automobile : question e réponses**. Editora Gatineau. Québec, 2011.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Global demand for wood products**. State of the world's forests, 2009. Disponível em: <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0350e/i0350e02a.pdf>>

FOREST PRODUCTS LABORATORY (FAO). **Wood handbook: wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. WI: Madison, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010. 508 p.

FRIHART, Charles R. **Adhesive bonding and performance testing of wood products**. Journal of ASTM international, n.7, vol. 2, 2005. Disponível em: <<http://209.195.157.104/DOWNLOAD/STP1463-EB.1485618-1.pdf>>

FUENTE, Adrian; MC PHERSON, Bradley. **Organic solvents and hearing loss: the challenge for audiology**. International Journal of Audiology, 2006; 45:367-381.

GALEMBECK, Fernando; GANDUR, Marcelo Catanocce. **Cientistas explicam o fenômeno da adesão**. Acessado em agosto, 2013. Disponível em: <http://www.quimica.com.br/revista/qd393/adesivos_tec1.htm>

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). IARC **Monographs on the evaluation of carcinogenic risk of chemicals to man**. International agency for research on cancer. Vol.29, pp. 345-389. Supplement 7, p211-216. Genebra, 2004.

IOELOVICH, M. **Cellulose as a nanostructured polymer : a short review**. Bio Resources, 2008. Disponível em: <http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_03/BioRes_03_4_1403_Ioelovich_Cellulose_Nanostruc_Polymer_Review.pdf>

IONESCU, Mihail. **Chemistry and technology of polyols for polyurethanes**. Smithers Rapra Technology, 2005. Disponível em: <http://www.knovel.com.ezproxy.bibl.ulaval.ca/web/portal/basic_search/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2217>

IWAKIRI, Setsuo; OLANDOSKI, Danielle P.; LEONHARDT, Gabriela; BRAND, Martha Andreia. **Produção de chapas de madeira compensada de cinco espécies de Pinus tropicais**. Ciência Florestal, Santa Maria, v.11, n.2, p.71-77, 2001.

IWAKIRI, Setsuo; SILVA, José de Castro; MOREIRA DA SILVA, José Reinaldo; ALVES, Carlos Roberto; PUEHRINGER, Carlos Augusto. **Produção de compensados de *Pinus taeda* L. e *Pinus oocarpa* Schiede com diferentes formulações de adesivo uréia-formaldeído**. R. Árvore, Viçosa, v.26, n.3, p. 371-375, 2002.

IWAKIRI, Setsuo. **Painéis de madeira reconstituída**. Editora FUPEF. Curitiba, 2005.

IWAKIRI, Setsuo; KEINERT JR., Sidon; PRATA, José Guilherme; ROSSO, Silvana. **Produção de painel compensado estrutural de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii***. Floresta, Curitiba, v.37, n.3, p. 363-367, set/dez 2007.

JAAKKOLA, Jouni J.K.; QUANSAH, Reginald. **Building materials and furnishing**. TARLO, Susan M.; CULLINAN, Paul. NEMERY, Benoit. Occupational and environmental lung diseases. Editora John Wiley&Sons, Ltd. Gothenburg, 2010.

JESUS, José Manoel Henriques de. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. São Carlos, 2000.

KABOORANI, Alireza; RIEDL, Bernard; BLANCHET, Pierre; FELLIN, Marco; HOSSEINAEI, Omid; WANG, Sequin. **Nanocrystalline cellulose (NCC): a renewable nano-material for polyvinyl acetate (PVA) adhesive**. European Polymer Journal 48. Québec, 2012.

KLOCK, Umberto; MUÑIZ, Graciela Inez Bolzon de; HERNANDEZ, José Anzaldo; ANDRADE, Alan Sulato de. **Química da madeira**. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. 3ª Edição. Curitiba, 2005.

LIMA, Nerci Nina; PIO, Nabor da Silveira. **Avaliação da gramatura de cola na propriedade de flexão estática em painéis compensados de *Copaifera duckei* Dwyer e *Eperua oleífera* Ducke**. Acta Amazônica. Vol. 37. 2007. Pag. 347-352. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/aa/v37n3/v37n3a05.pdf>>

LIMA, Nerci Nina; PIO, Nabor da Silveira; CUNHA, Ulisses Silva da; LUCAS FILHO, Fernando Cardoso; BARBOSA FILHO, José. **Influência da gramatura na resistência da linha de cola aos esforços de cisalhamento em painéis compensados de *Copaifera duckei* Dwyer e *Eperua oleífera* Ducke**. Acta Amazônica. Vol. 41. Pag. 83-90. 2011. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/aa/v41n1/a10v41n1.pdf>>

MACEDO, Angela Regina Pires; ROQUE, Carlos Alberto Lourenço. **Painéis de madeira**. BNDES, setorial n.6, p.117-132. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <http://www.bndespar.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/painel.pdf>

PADDAY, J.F. **Handbook of adhesion. Wetting and word of adhesion**. p. 594. 2ª Edição. Editora Chichester. Inglaterra: 2005.

MATTOS, René Luiz Grion; GONÇALVES, Roberta Mendes; CHAGAS, Flávia Barros das. **Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas**. Produtos florestais. BNDES Setorial, n.27, p.121-156. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2706.pdf>

MORESCHI, João Carlos. **Propriedades da madeira**. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Curitiba, 2005.

PACKHAM, D.E. **Handbook of adhesion. Adhesion**. p. 16. 2ª Edição. Editora Chichester. Inglaterra: 2005.

PIZZI, A. ; MITTAL, K.L. **Handbook of adhesive technology**. 2ª Edição. Editora Taylor&Francis. Nova York, 2003.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **Estruturas de madeira**. 6ª Edição. LTC: Rio de Janeiro, 2003.

PIO, N.S. **Produção de painéis estruturais de lâminas paralelas (PLP) de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade federal do Paraná, 168 f, Curitiba, 2002.

PRATA, José Guilherme. **Desempenho de um sistema de qualidade em uma fábrica de painéis compensados**. Curitiba, 2006.

REZENDE, Marcos Antonio; ARONI, Antonio Sergio; COSTA, Vladimir Eliodoro; SEVERO, Elias Taylor D.; LATORRACA, João Vicente de F.. **Densidade e produtividade da madeira de híbrido e seminal de *Pinus caribaea***. Floresta e Ambiente, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p. 08-17, 2008.

SCANAVACA JUNIOR, Laerte; GARCIA, José Nivaldo. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla***. Scientia Forestalis. IPEF, n.65, p.120-129, 2004. Disponível em:<
<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr65/cap12.pdf>>

SHI, Sheldon; WALKER, John. **Primary Wood Processing: principles and practice**. Capítulo 11. Pag. 391 – 426. 2ª Edição. Springer Netherlands, 2006.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. **Handbook of adhesive technology. Capítulo 3: Theories and mechanisms of adhesion**.. 2ª Edição. Editora Marcel Dekker. New York: 2003.

SOLAL, Cécilia; BOULANGER, Guillaume; ROUSSELLE, Christophe; MANDIN, Corinne; DOR, Frédéric; CABANES, Pierre-André. **Evaluation des risques sanitaires pour la population générale liés à la présence de formaldéhyde dans**

les environnements intérieurs et extérieurs. Air Pur. N°74. 2008. Disponível em: <http://www.appa.asso.fr/_docs/7/fckeditor/file/Revues/AirPur/AirPur_74_Solal.pdf>

SUN, Run Cang; SUN, X.F.; TOMKINSON, J. **Hemicelluloses and their derivatives.** American Chemical Society. Washington, DC, 2004. Disponível em: <<http://pubs.acs.org.ezproxy.bibl.ulaval.ca/doi/pdf/10.1021/bk-2004-0864.ch001>>

SZYCHER, Michael. **Szycher's handbook of polyurethanes.** 2ª Edição. Editora CRC Press. 2012.

THIELEMANS, Wim; WOOL, Richard P. **Lignin esters for use in unsaturated thermosets: modification and solubility modeling.** Biomacromolecules, 2005.

TORÉN, Kjell. **Wood and textile industries.** TARLO, Susan M.; CULLINAN, Paul. NEMERY, Benoit. Occupational and environmental lung diseases. Editora John Wiley&Sons, Ltd. Gothenburg, 2010.

TRIANOSKI, Rosilani. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada.** Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. Curitiba, 2010.

TRIANOSKI, Rosilani. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de Pinus tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos.** Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Curitiba, 2012.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood: structure properties, utilization.** Editora Van Nostrand Reinhold. Nova York, 1991.

VAN DER WAALS, J.D. **The equation of state for gases and liquids.** Nobel lecture, 1910.

VICK, C.B. **Adhesive bonding of wood materials.** Wood handbook – Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL – GTR – 113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. Chap.9. 1999. 463 p.

APÊNDICE A – Delineamento das formulações dos adesivos à base de formaldeído

Tratamento	Espécie	Adesivo	Lâminas	Gramatura (g/m ²)
1	<i>Pinus c. bahamensis</i>	Uréia formaldeído	15	180
2		Fenol-formaldeído	15	
3		Poliuretano	15	

Formulação do adesivo uréia-formaldeído

Resina UF	→	100	
Trigo	→	20	
Água	→	20	
Catalisador	→	1,7	
Total	→	141,7	100%
<hr/>			
Resina UF	→	100	→a = 70,57%
Trigo	→	20	→b = 14,11%
Água	→	20	→c = 14,11%
Catalisador	→	1,7	→d = 1,20%

Batida de cola

Gramatura: 360g/m² - linha dupla / Área colagem: 500 x 500mm = 0,25 m²
 Linha de cola simples = 180g

$$\begin{array}{r} 180\text{g} - 1\text{ m}^2 \\ \times \quad \quad - \quad 0,25\text{m}^2 \end{array}$$

(x) = 45 g / linha de cola simples / total 4 linhas cola = 180g.

Batelada: 600 g: 3 chapas / cálculo das frações:

Resina→	600g x 70,57%	=	423,42 g
Trigo→	600g x 14,11%	=	84,66 g
Água→	600g x 14,11%	=	84,66 g
Catalisador→	600g x 1,20%	=	7,2 g (usar sólido)

** Determinar viscosidade no copo Ford 8

Estimativa do teor de sólidos da batida de cola (tsr= 65%)= 35,77%

$$\text{TSbc} = (\text{R} \times \text{TSr}) / (\text{R} + \text{C} + \text{T} + \text{A})$$

Parâmetros do ciclo de prensagem

- Pressão específica: 10 kgf/cm² = 1 MPa
- Temperatura: 110°C
- Tempo prensagem 8 min (*)

Formulação do adesivo fenol-formaldeído

Resina UF	→	100	
Trigo	→	15	
Água	→	15	
Total	→	130	100%
<hr/>			
Resina UF	→	100	→a = 76,90%
Trigo	→	15	→b = 11,50%
Água	→	15	→c = 11,50%

Batida de cola

(x) = 45 g / linha de cola simples / total 4 linhas cola = 180g.

Batelada: 600 g: 3 chapas / cálculo das frações:

Resina→	600g x 76,90%	=	461,40 g
Trigo→	600g x 11,50%	=	69 g
Água→	600g x 11,50%	=	69 g

** Determinar viscosidade no copo Ford 8

Parâmetros do ciclo de prensagem

- Pressão específica: 10 kgf/cm² = 1 MPa
- Temperatura: 130°C
- Tempo prensagem (T140°C): 10 min (*)

Efeito da gramatura do PU sobre as propriedades físicas e mecânicas

Tratamento	Espécie	Adesivo	Gramatura	Lâminas
1	<i>Pinus c.</i>	Poliuretano	180	(fase anterior)
2	<i>bahamensis</i>	Poliuretano	160	15
3		Poliuretano	140	15
4		Poliuretano	120	15

Gramatura: 320g/m² - linha dupla / Área colagem: 500 x 500mm = 0,25 m²
Linha de cola simples = 160g

$$\begin{array}{r} 160\text{g} - 1\text{ m}^2 \\ \times - 0,25\text{m}^2 \end{array}$$

(x) = 40 g / linha de cola simples

Gramatura: 280g/m² - linha dupla / Área colagem: 500 x 500mm = 0,25 m²
Linha de cola simples = 140g

$$\begin{array}{r} 140\text{g} - 1\text{ m}^2 \\ \times - 0,25\text{m}^2 \end{array}$$

(x) = 35 g / linha de cola simples

Gramatura: 240g/m² - linha dupla / Área colagem: 500 x 500mm = 0,25 m²
Linha de cola simples = 120g

$$\begin{array}{r} 120\text{g} - 1\text{ m}^2 \\ \times - 0,25\text{m}^2 \end{array}$$

(x) = 30 g / linha de cola simples

Condições de prensagem do PU

Temperatura de prensagem: 90°C

Tempo de prensagem: 20 minutos Pressão específica: 1 MPa

APÊNDICE B – Materiais utilizados para a confecção dos painéis compensados

- 1 espátula metálica;
- Espátulas de plástico;
- 1 balança de marca BEL (Máx: 10.000 g; Mín: 20 g; d=0,1g; e=1g);
- 2 béquers de plástico de 500 ml;
- 1 béquer de vidro de 50 ml;
- 1 prensa Siempel Campi;
- 500 g de farinha de trigo;
- 1 recipiente metálico;
- 1 batedeira;
- Poliálcool de óleo de mamona;
- Pré-polímero;
- Adesivo comercial à base de uréia-formaldeído;
- Adesivo comercial à base de fenol-formaldeído;
- Catalizador sulfato de amônia;

APÊNDICE C – Tabelas com os resultados referentes aos ensaios mecânicos

Tabela 3 - Resultados médios de resistência ao cisalhamento de painéis compensados produzidos com os adesivos (180 g/m²)

Tratamentos		PU	FF	UF
Seco	RLC (MPa)	2,71 a	2,26 b	1,65 c
	CV (%)	11,71	10,43	12,64
	Falha (%)	76,33	40,33	21,33
Água fria	RLC (MPa)	1,99 a	0,91 c	1,17 b
	CV (%)	16,03	24,73	20,76
	Falha (%)	10,67	6,67	8,33
Ciclo	RLC (MPa)	1,11 a	0,79 b	-
	CV (%)	21,28	18,52	-
	Falha (%)	2,50	5,67	-
Fervura	RLC (MPa)	1,09 a	0,88 a	-
	CV (%)	51,67	16,16	-
	Falha (%)	5,38	7,33	-

PU: Poliuretano; FF: Fenol-formaldeído; UF: Uréia-formaldeído; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de probabilidade; Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente da variação.

Tabela 4 - Resultados médios de flexão estática paralela às fibras de painéis compensados produzidos com adesivos poliuretano, fenol-formaldeído e uréia-formaldeído (180 g/m²)

Tratamento	ME _{12%} (g/cm ³)	CV (%)	Paralelo			
			MOR (MPa)	CV (%)	MOE (MPa)	CV (%)
PU	0,541 a	5,70	63,32 a	16,80	6.605,98 a	17,35
FF	0,565 a	7,66	61,19 a	20,84	7.190,81 a	27,87
UF	0,560 a	6,93	61,98 a	12,98	7.149,49 a	21,22

PU: Poliuretano; FF: Fenol-formaldeído; UF: Uréia-formaldeído; ME12%: Massa específica aparente a 12% de umidade; MOR: Módulo de Ruptura; MOE: Módulo de Elasticidade; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de probabilidade; Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente da variação.

Tabela 5 - Resultados médios de flexão estática perpendicular às fibras de painéis compensados produzidos com adesivos poliuretano, fenol-formaldeído e uréia-formaldeído (180 g/m²)

Tratamento	Perpendicular			
	MOR (MPa)	CV (%)	MOE (MPa)	CV (%)
PU	34,78 a	14,22	2.132,38 ab	13,12
FF	32,18 a	18,39	2.252,73 a	19,75
UF	25,22 b	14,98	1.919,31 b	13,18

PU: Poliuretano; FF: Fenol-formaldeído; UF: Uréia-formaldeído; ME12%: Massa específica aparente a 12% de umidade; MOR: Módulo de Ruptura; MOE: Módulo de Elasticidade; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de probabilidade; Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente da variação.

Tabela 6 - Resultados médios de resistência ao cisalhamento de painéis compensados produzidos com adesivo poliuretano em diferentes gramaturas

Tratamentos		PU 180	PU 160	PU 140	PU 120
Seco	RLC (MPa)	2,71 a	2,70 a	2,38 b	2,62 a
	CV (%)	11,71	10,16	14,32	7,52
	Falha (%)	76,33	86,00	94,33	84,67
Água fria	RLC (MPa)	1,99 a	1,97 a	1,75 a	1,81 a
	CV (%)	16,03	10,52	10,12	14,64
	Falha (%)	10,67	8,67	23,33	11,79
Ciclo	RLC (MPa)	1,16 ab	1,44 a	1,42 ab	1,09 b
	CV (%)	24,80	18,04	10,99	52,36
	Falha (%)	2,50	7,33	26,0	10,71
Fervura	RLC (MPa)	1,23 a	1,44 a	1,32 a	1,14 a
	CV (%)	40,39	11,62	11,68	45,73
	Falha (%)	6,36	6,53	11,33	10,67

PU: Poliuretano; 180, 160, 140, 120: gramaturas utilizadas; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de probabilidade; Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente da variação.

Tabela 7 - Resultados médios de flexão estática paralela às fibras de painéis compensados produzidos com adesivo poliuretano em diferentes gramaturas

Tratamento	ME (g/cm ³)	CV (%)	Paralelo			
			MOR (MPa)	CV (%)	MOE (MPa)	CV (%)
PU 180	0,541 a	5,70	63,32 a	16,80	6.605,98 ab	17,35
PU 160	0,537 a	5,66	65,08 a	18,38	7.253,96 a	20,88
PU 140	0,528 a	6,20	63,81 a	11,49	6.541,02 ab	13,31
PU 120	0,525 a	5,78	56,88 a	23,07	5.530,43 b	21,08

PU: Poliuretano; 180, 160, 140, 120: gramaturas utilizadas; ME12%: Massa específica aparente a 12% de umidade; MOR: Módulo de Ruptura; MOE: Módulo de Elasticidade; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de probabilidade; Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente da variação.

Tabela 8 - Resultados médios de flexão estática perpendicular às fibras de painéis compensados produzidos com adesivo poliuretano em diferentes gramaturas

Tratamento	Perpendicular			
	MOR (MPa)	CV (%)	MOE (MPa)	CV (%)
PU 180	34,78 a	14,22	2.132,38 a	13,12
PU 160	27,29 b	7,76	1.980,02 a	13,03
PU 140	27,00 b	15,19	2.087,51 a	24,04
PU 120	31,07 ab	9,59	2.117,70 a	11,87

PU: Poliuretano; 180, 160, 140, 120: gramaturas utilizadas; ME12%: Massa específica aparente a 12% de umidade; MOR: Módulo de Ruptura; MOE: Módulo de Elasticidade; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de probabilidade; Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente da variação.