

DANILO SOARES GALDINO

Análise do desempenho do painel de madeira compensada produzido com lâminas termorretificadas por dois diferentes métodos e coladas com resina poliuretana

Danilo Soares Galdino

Análise do desempenho do painel de madeira compensada produzido com lâminas termorretificadas por dois diferentes métodos e coladas com resina poliuretana

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para fim de qualificação da obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cristiane Inácio de Campos

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros

Guaratinguetá - SP
2020

G149a	Galdino, Danilo Soares Análise do desempenho do painel de madeira compensada produzido com lâminas termorretificadas por dois diferentes métodos e coladas com resina poliuretana / Danilo Soares Galdino – Guaratinguetá, 2020. 85 f : il. Bibliografia: f. 75-85 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Orientadora: Profª Drª. Cristiane Inácio de Campos Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros 1. Painéis de madeira. 2. Termorretificação. 3. Compensados de madeira. 4. Adesivos. 5. Lâminas de madeira. I. Título. CDU 674.02(043)
-------	---

DANILO SOARES GALDINO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

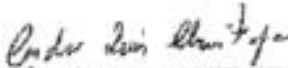
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

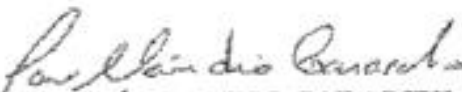
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. CRISTIANE INÁCIO DE CAMPOS
Orientadora / UNESP-ITAPEVA


Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTÓFORO
UFSCar


Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO CARASCHI
UNESP-ITAPEVA

DADOS CURRICULARES

DANILO SOARES GALDINO

NASCIMENTO	01.05.1983 – ITAPEVA / SP
FILIAÇÃO	Sergio Galdino Terezinha Soares Galdino
1998/2000	Curso Técnico Informática - Nível Técnico Colégio Objetivo Itapetininga
2001/2004	Curso de Graduação em Comunicação Social com habilitação em Publicidade e Propaganda - Nível de Bacharelado Faculdades Integradas de Itapetininga
2007/2012	Curso de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira - Nível de Bacharelado Universidade Estadual Paulista – Câmpus Experimental de Itapeva
2018/2020	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Nível de Mestrado Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por iluminar meu caminho e me permitir chegar até aqui.

À professora Dr.^a Cristiane Inácio de Campos pela oportunidade fornecida, pela prova de confiança, amizade e orientação desse trabalho.

Ao professor Dr. Ricardo Marques Barreiros por algumas vezes reservar um tempo para tirar algumas dúvidas.

Ao funcionário Brito do Laboratório de Propriedades Mecânicas pela atenção sempre que precisei e pelos cortes das lâminas e painéis.

À professora Dr.^a Elidiane Cipriano Rangel da UNESP Sorocaba por disponibilizar os equipamentos fundamentais para a realização deste trabalho e ao técnico Lucas por me auxiliar nos ensaios.

A todos colegas, professores e funcionários da UNESP Itapeva que me acolheram e contribuíram para minha formação.

Aos meus pais, por todos os ensinamentos e por estarem ao meu lado sempre, mostrando que a vida é difícil, mas com esforço, dedicação e força de vontade conseguimos superar os obstáculos.

Aos familiares e amigos presentes todos os dias na minha vida me apoiando.

Aos meus filhos Lohane e Ryan por ter dado um novo sentido à minha vida.

RESUMO

Nos últimos anos, o estudo do tratamento térmico na indústria madeireira vem chamando a atenção dos pesquisadores por ser mostrar como uma proposta de preservação sustentável em comparação aos tratamentos químicos tradicionalmente realizados. Com base nisto, este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho do painel compensado produzido com lâminas termorretificadas e coladas com a resina poliuretana à base de óleo de mamona, uma alternativa para substituição do adesivo fenol-formaldeído, que possui a vantagem de ser de origem natural e de não liberar substâncias nocivas ao homem e ao meio ambiente. O processo de termorretificação foi realizado em três diferentes temperaturas (160, 180 e 200°C) e para duas formas de tratamento (prensa e estufa). As alterações ocorridas nas lâminas, após o tratamento, foram avaliadas por meio de testes de rugosidade, utilizando um perfilômetro, e de molhabilidade pelo método de gota, utilizando um goniômetro, os quais mostraram que com o aumento da temperatura as lâminas ficaram menos rugosas e molháveis. O método prensa se mostrou mais efetivo para realizar a termodegradação da madeira na análise do teor de extrativos totais realizado seguindo a norma TAPPI T-257:2012. As alterações verificadas na lâmina impactaram as propriedades físico-mecânicas do painel acabado que foram avaliadas por meio de ensaios recomendados por documentos normativos brasileiros: massa específica aparente (ABNT NBR 9485:2011), inchamento em espessura (ABNT NBR 9535:2011), teor de umidade (ABNT NBR 9484:2011), absorção de água (ABNT NBR 9486:2011), flexão estática (ABNT NBR 9533:2013) e cisalhamento na linha de cola (ABNT NBR ISO 12466-1:2012). Verificou-se a partir dos testes físicos que o painel produzido com lâminas tratadas apresentam menores teores de umidade e densidades equivalente ao painel produzidos com lâminas sem tratamento. Com relação as propriedades de absorção e inchamento em espessura, os ensaios indicaram que a termorretificação tornou os painéis mais hidrofóbicos, indicando a eficiência dos tratamentos quanto ao contato com água. Em termos de desempenho mecânico, os painéis tiveram baixos decréscimos em suas propriedades, de forma que apenas algumas exceções não continuaram atendendo as especificações propostas pelo catálogo ABIMCI. Por fim, analisando todos os resultados, pôde-se verificar que o tratamento mais eficiente foi o que utilizou lâminas termorretificadas em prensa em temperatura de 180 °C.

PALAVRAS-CHAVE: Painel compensado. Retificação térmica. Resina Poliuretana. Propriedades físico-mecânicas. *Pinus*.

ABSTRACT

In recent years, the study of heat treatment in the wood industry has been attracting the attention of researchers as a proposal for sustainable use compared to the traditionally performed chemical methods. Based on this, this work aimed to evaluate the performance of plywood panel produced with heat-treated veneers and glued with a castor oil-based polyurethane resin, an alternative to replace the phenol-formaldehyde adhesive. The advantage of using polyurethane resin is its natural origin and do not release harmful substances to man and the environment. The heat treatment process was carried out at three different temperatures (160, 180 and 200 ° C) and for two forms of treatment. The changes occurred in the veneers, after treatment, were evaluated by roughness tests and wettability, using a goniometer. As the temperature increased, the veneers became less rough and wettable. The press method proved to be more effective to perform the thermo-degradation of wood in the analysis of the total extractive content carried based a TAPPI T-257: 2012 norm. The changes verified in the veneer impacted the physical-mechanical properties of the finished panel, which were evaluated through tests recommended by Brazilian normative documents: density (ABNT NBR 9485: 2011), thickness swelling (ABNT NBR 9535: 2011), moisture (ABNT NBR 9484: 2011), water absorption (ABNT NBR 9486: 2011), static bending test (ABNT NBR 9533: 2013) and glue shear strength (ABNT NBR ISO 12466-1: 2012). It was found from the physical tests that the panel produced with treated veneers has lower moisture and density equivalent to the panel produced with untreated veneers. About absorption properties and thickness swelling, the tests indicate that the heat treatment made the panels more hydrophobic, recorded the efficiency of the tests of use and contact with water. In terms of mechanical performance, the panels suffered a reduction in values, so some panels were not considered acceptable by the specifications applied by ABIMCI catalog. Finally, analyzing all the results, it is possible to verify if the most efficient treatment was the one that uses heat-treated veneers using press with a temperature of 180 °C.

KEYWORDS: Plywood. Heat treatment. Polyurethane resin. Physical-mechanical properties. Pinus.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama resumido dos painéis laminados que podem ser produzidos.....	16
Figura 2 - Forma de construção do painel compensado.	18
Figura 3 - Mostra a linha de simetria de um painel compensado de 7 lâminas.....	18
Figura 4 - Representação de operação de laminação por fatiamento.	21
Figura 5 - Representação da laminação por torneamento rotativo.	21
Figura 6 – Diagrama temperatura x tempo do processo ThermoWood.....	30
Figura 7 - Ilustração das medidas de ângulo de contato e da tensão superficial	35
Figura 8 - Comportamento da gota sobre a superfície.....	35
Figura 9 - Etapas do experimento para a produção dos painéis.	38
Figura 10 - Condicionamento das lâminas dentro da estufa para o tratamento térmico.	39
Figura 11 - Diagrama do processo de termorretificação em estufa.	40
Figura 12 - Prensa utilizada no tratamento térmico das lâminas.	40
Figura 13 – Seccionamento da lâmina para investigação das alterações de superfície.	41
Figura 14 – Etapas do processo de extração.....	42
Figura 15 - Rugosímetro de agulha <i>Veeco</i> realizado em lâminas de <i>pinus</i>	43
Figura 16 - Ilustração da avaliação da rugosidade	43
Figura 17 - Goniômetro digital Ramé-Hart instruments co.....	44
Figura 18 - Lâminas de madeira classificadas.....	45
Figura 19 - Separação das lâminas conforme classificação visual e tratamento.	46
Figura 20 - Aplicação do adesivo.	46
Figura 21 - Montagem do painel	47
Figura 22 – Pré-prensagem do painel.	47
Figura 23 - Painel confeccionado.	48
Figura 24 - Corpo de prova para massa específica aparente.	48
Figura 25 - Corpo de prova para inchamento em espessura.....	49
Figura 26 - Corpos de prova no ensaio de inchamento.	50
Figura 27 - Corpo de prova para absorção de água.	52
Figura 28 - Corpo de prova para flexão estática paralela e perpendicular.	53
Figura 29 - Ensaio de flexão estática paralela e perpendicular.....	53
Figura 30 - Corpos de prova para cisalhamento na linha de cola.....	54
Figura 31 - Ensaio de cisalhamento na linha de cola.	55
Figura 32 - Resultados do teor de extrativos em função dos tratamentos.	57

Figura 33 - Valores médios para os tratamentos para a rugosidade.....	59
Figura 34 - Imagens das gotas depositadas sobre a superfície da lâmina	60
Figura 35 – Histerese do ângulo de contato devido a rugosidade da superfície.....	62
Figura 36 – Valores médios para os tratamentos para a massa específica aparente base seca. 63	
Figura 37 - Valores médios para os tratamentos para o teor de umidade.	65
Figura 38 - Valores médios para os tratamentos para a absorção de água.....	66
Figura 39 - Valores médios para os tratamentos para o inchamento em espessura.	68
Figura 40 - Resultados e valor mínimo de referência para o MOR paralelo às fibras	70
Figura 41 - Resultados e valor mínimo de referência para o MOE paralelo às fibras.....	71
Figura 42 - Resultados e valor mínimo de referência para o MOR perpendicular às fibras. ...	73
Figura 43 - Resultados e valor mínimo de referência para o MOE perpendicular às fibras. ...	74
Figura 44 - Resultados experimentais e valor mínimo de referência para tensão de ruptura na linha de cola.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios dos parâmetros de rugosidade superficial em função do tipo de tratamento térmico e temperatura.	56
Tabela 2 - Valores médios de rugosidade superficial em função do tratamento térmico aplicado.....	58
Tabela 3 - Valores médios de ângulo de contato em função do tratamento térmico aplicado..	60
Tabela 4 - Valores médios de massa específica aparente base seca acompanhados dos desvios padrões.....	62
Tabela 5 - Valores médios do teor de umidade acompanhados dos desvios padrões.	64
Tabela 6 - Valores médios de absorção de água acompanhados dos desvios padrões.....	66
Tabela 7 - Valores médios de inchamento em espessura.	67
Tabela 8 - Valores médios acompanhados dos respectivos desvios padrões para direção paralela às fibras.	69
Tabela 9 - Valores médios acompanhados dos respectivos desvios padrões para direção perpendicular às fibras.....	72
Tabela 10 - Valores médios acompanhados dos respectivos desvios padrões para tensão de ruptura na linha de cola.	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2.2	JUSTIFICATIVA	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	PAINÉIS A BASE DE MADEIRA.....	16
3.2	PAINÉIS COMPENSADOS.....	17
3.3	PRODUÇÃO DOS PAINÉIS COMPENSADOS.....	19
3.3.1	Preparo das toras	19
3.3.2	Laminação	20
3.3.3	Secagem das lâminas	21
3.3.4	Preparação das lâminas	22
3.3.5	Aplicação de adesivo.....	23
3.3.6	Montagem do painel	24
3.3.7	Pré-prensagem do painel.....	24
3.3.8	Prensagem do painel.....	24
3.4	ADESIVOS PARA USO EXTERIOR.....	25
3.4.1	Fenol-Formaldeído (FF).....	26
3.4.2	Resina poliuretana à base de mamona (PU).....	27
3.5	TRATAMENTO TÉRMICO.....	28
3.5.1	Modificações nas propriedades de resistência e rigidez	30
3.5.2	Modificações nas propriedades físicas	31
3.5.3	Modificações na superfície e propriedades de colagem.....	32
3.5.4	Modificações na molhabilidade	34
3.6	CONSIDERAÇÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	TRATAMENTO TÉRMICO DAS LÂMINAS	39
4.1.1	Retirada de amostra para análise	40
4.2	ANÁLISE QUÍMICA E SUPERFICIAL DAS LÂMINAS	41
4.2.1	Teor de extrativos totais	41
4.2.2	Perfil de rugosidade superficial.....	42
4.2.3	Análises de ângulo de contato	44
4.3	PRODUÇÃO DOS PAINÉIS	45

4.3.1	Classificação das lâminas	45
4.3.2	Secagem das lâminas	46
4.3.3	Aplicação do adesivo e montagem do painel	46
4.3.4	Pré-prensagem e prensagem dos compensados.....	47
4.4	ENSAIOS FÍSICOS	48
4.4.1	Massa específica aparente	48
4.4.2	Inchamento em espessura	49
4.4.3	Teor de umidade.....	51
4.4.4	Absorção de água.....	51
4.5	ENSAIOS MECÂNICOS.....	52
4.5.1	Flexão estática paralela e perpendicular	52
4.5.2	Cisalhamento da linha de cola	54
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	ANÁLISE QUÍMICA E SUPERFICIAL DA LÂMINA.....	56
5.1.1	Teor de extrativos.....	56
5.1.2	Rugosidade superficial	58
5.1.3	Ângulo de contato superficial	59
5.2	ENSAIOS FÍSICOS	62
5.2.1	Massa específica aparente	62
5.2.2	Teor de umidade.....	64
5.2.3	Absorção de água após imersão por 24 horas	66
5.2.4	Inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas	67
5.3	ENSAIOS MECÂNICOS.....	69
5.3.1	Flexão estática paralela às fibras.....	69
5.3.2	Flexão estática perpendicular às fibras	72
5.3.3	Cisalhamento na linha de cola	74
6	CONCLUSÕES.....	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

A demanda nos últimos anos por um meio ambiente mais sustentável fez com que o valor da madeira fosse redescoberto por engenheiros e arquitetos de todo o mundo que tem encontrado, principalmente em seus produtos derivados, características físicas e mecânicas apropriadas à construção de pequenas e grandes estruturas, com grande durabilidade e efeitos estéticos desejados.

Estes derivados, mais conhecidos como painéis de madeira, são materiais versáteis que como substitutos para a madeira maciça podem ser direcionados a diversas utilizações, destacando-se a construção civil e indústria moveleira. Dentre esses painéis, destaca-se o compensado que é objeto de interesse deste trabalho, produto este manufaturado a partir de lâminas beneficiadas da madeira, que apesar do maior custo de produção em relação aos painéis de madeira reconstituída, possui ainda uma ampla demanda de mercado.

Segundo último relatório divulgado pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2017), este tipo de painel teve um aumento de produção na ordem de 3,8% em 2016 e atingiu 2,7 milhões de m³, ocupando a 3^a posição dentre os painéis de madeira produzidos. Além disso, o Brasil ocupa hoje o 8º lugar no *ranking* mundial dos maiores produtores de compensado, com exportações que trazem relevante contribuição para a balança comercial e geram muitos empregos e renda em todas as regiões do país.

No Brasil, esses painéis têm uso consolidado na construção civil, como fôrma de concreto, compondo estrutura de pisos, tapumes, bandejas de proteção, entre outros, se destacando por apresentar alta estabilidade dimensional, por ser resistente, relativamente leve e fácil de manusear, o que o viabiliza para aplicação em sistemas construtivos industrializados como *Wood Frame* e *Steel Frame* onde concorrem com o OSB - *Oriented Strand Board* na utilização como placas de parede e chapas de piso.

Para aglutinação das peças de madeira destinadas ao uso externo, como é o caso na construção civil, as indústrias fazem uso da resina fenol-formaldeído (FF). Entretanto, por volta dos anos 1990, houve uma tendência mundial para uso de produtos biodegradáveis, não-poluentes e originados de insumos renováveis. Esta tendência fez avançar, principalmente em nosso país, a pesquisa a respeito da resina poliuretana derivada do óleo de mamona, seguindo a tendência de desenvolvimento de produtos sustentáveis do mercado (FIORELLI et al. 2011).

A competitividade deste adesivo em relação a outros polímeros existentes está, além das propriedades mecânicas, no fato de ser originário de matéria-prima natural e renovável, aos preços razoáveis dos di-isocianatos e, por não ser agressivo ao homem nem ao meio ambiente

(VILAR, 2005).

Quanto à madeira, a escolha da espécie deve ser de acordo com suas características anatômicas e comportamento durante o processo de colagem, gerando influência na resistência de linha de cola (IWAKI, 2001). No Brasil, as espécies florestais mais utilizadas são as espécies do gênero *Pinus*, como o *P. elliotti* e *P. taeda*, por apresentar boas características de laminação.

Por serem materiais de origem natural, o compensado sofre a redução na confiança pela perda de qualidade quando exposto à altas taxas de umidade e ataque por agentes deterioradores. Isto é mais crítico no Brasil, país com predominância tropical, que por apresentar alta temperatura e umidade favorece a deterioração da madeira (ARAÚJO et al. 2012).

Na literatura correlata, a realização do tratamento térmico em painéis à base de madeira tem por objetivo aumentar a durabilidade de chapas expostas a intempéries, sem o uso de compostos químicos, obtendo ao fim um produto menos agressivo ao homem e ao meio ambiente. A termodegradação controlada dos seus principais constituintes químicos: celulose, hemiceluloses e lignina, melhoram algumas propriedades, tais como estabilidade dimensional, resistência ao ataque de organismos xilófagos e a diminuição da higroscopicidade.

Sobre a termorretificação em painéis, a maior parte dos estudos se concentra no adesivo fenol-formaldeído e no tratamento do painel acabado, pouco abordando a respeito da influência da termorretificação de lâminas para sua manufatura e a interação com a resina poliuretana, ou seja, se apresentarão propriedades mecânicas compatíveis às solicitações necessárias e se possuem a mesma qualidade se comparado aos painéis comerciais.

Assim, com base no exposto, a proposta visou submeter lâminas de madeira a tratamento térmico nas temperaturas 160, 180 e 200°C, por duas diferentes técnicas (em estufa e prensa), por um período de 30 minutos, com objetivo de avaliar o desempenho técnico deste produto que possui características diferenciadas, alternativo ao painel compensado normal produzido com adesivo fenol-formaldeído.

2 OBJETIVOS

Avaliar o desempenho de painéis compensados produzidos com lâminas de madeira de *Pinus* termorretificadas em estufa e em prensa e coladas com a resina poliuretana derivado de óleo de mamona.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente estudo foram:

- Realizar a termorretificação das lâminas em estufa e em prensa em três diferentes temperaturas – 160, 180 e 200°C;
- Avaliar as alterações químicas e superficiais das lâminas submetidas a todos os tratamentos realizados;
- Avaliar a influência da técnica de tratamento das lâminas entre estufa e prensa utilizadas para a produção de painéis;
- Avaliar a influência do tratamento térmico das lâminas coladas com resina poliuretana sobre as propriedades físicas e mecânicas dos painéis compensados;

2.2 JUSTIFICATIVA

O segmento de painéis à base de madeira apresenta crescimento nas últimas décadas, no entanto, um fator limitante para sua utilização é a baixa durabilidade destes materiais, especialmente quanto ao ataque de agentes xilófagos, requisito de grande relevância principalmente no segmento da construção civil.

Destaca-se a necessidade cada vez maior de evolução deste setor, principalmente com relação aos sistemas construtivos industrializados, tendo em vista ser um segmento que pouco evoluiu nas últimas décadas quando comparado a outros setores como as indústrias automobilística, aeronáutica, eletrônica, química, farmacêutica. Quando se analisa a construção unifamiliar em países da América do Norte verifica-se que 9 entre 10 habitações são construídas em madeira empregando, especialmente, tecnologias como o *Wood Frame* e *Steel Frame*.

Nos últimos anos, empresas do segmento tem buscado junto a órgãos regulamentadores maior investimento e financiamento de habitações em madeira a partir destas novas tecnologias. Em 2017, o Ministério das Cidades - Secretaria Nacional da Habitação Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) Sistema Nacional de Avaliações Técnicas

(SINAT) criaram um documento denominado Diretriz SINAT N°05 (2017), onde especifica diretrizes para avaliação técnica de produtos que possam ser utilizados em sistemas construtivos estruturados com peças leves de madeira maciça serrada, com fechamentos em painéis (sistemas leves tipo *Light Wood Framing*).

Dentre os painéis especificados neste documento estão o compensado e os compostos por partículas “*strands*” (OSB – *Oriented Strand Board*). Nesta diretriz é especificado que o painel compensado utilizado para o fechamento vertical deve ser submetido a tratamento químico com CCA. No entanto, o mesmo documento especifica que caso sejam autorizadas outras substâncias ou métodos com eficiência e aplicação semelhantes, seu uso também será considerado adequado, desde que sejam incorporadas a esta Diretriz.

O tratamento térmico vem sendo realizado em diferentes espécies de madeira, com destaque para as espécies do gênero *Pinus* que até então era usada para fins não estruturais e que, recentemente, tem havido um interesse no uso desta espécie tratadas termicamente para fins estruturais (MAJANO; HUGHES; CABO, 2012).

Com o intuito de contribuir para o uso de painéis de madeira na construção civil, principalmente, esta pesquisa objetivou apresentar um novo procedimento de manufatura e tratamento do compensado, este produzido a partir de lâminas de *Pinus*, de modo a proporcionar maior durabilidade a esses painéis, garantindo a confiabilidade e qualidade da edificação a partir de técnicas e insumos mais sustentáveis, renovável e menos agressivos ao homem e ao meio ambiente, no caso utilizando a resina poliuretana à base de mamona e o processo de termorreificação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PAINÉIS A BASE DE MADEIRA

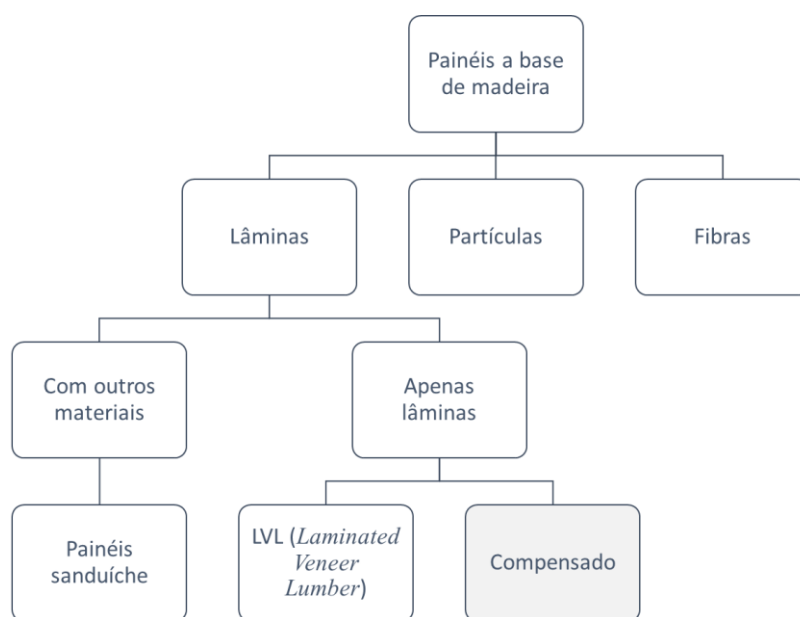
Painéis a base de madeira é um termo geral para uma variedade de diferentes produtos que têm uma gama de propriedades de engenharia. Enquanto alguns tipos de painel são relativamente novos no mercado, outros foram desenvolvidos e introduzidos com sucesso há mais de um século (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

É frequentemente citado na literatura que a fabricação desse produto foi trazida a partir da diminuição na oferta de árvores com grandes dimensões, o que resultou na época num aumento de preço da matéria-prima. Esse cenário favoreceu a busca por alternativas de uso das árvores de forma mais eficiente, nascendo assim os painéis de madeira (IRLE et al., 2012).

Além de poder utilizar toras de menor qualidade ou subprodutos da indústria madeireira, os painéis possuem a vantagem de não serem limitados em relação a tamanho e largura. Além disso, a técnica de fabricação procura diminuir o peso das peças e deixar suas propriedades mais uniformes, reduzindo variações não apenas em aparência, como também em densidade, resistência e durabilidade, sem perder as propriedades térmicas, acústicas e isolantes inerentes a esta matéria-prima (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

Os painéis a base de madeira podem ser feitos com partículas, lâminas ou fibras, sendo que este trabalho se concentrou no estudo do painel compensado, em destaque na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama resumido dos painéis laminados que podem ser produzidos.



Fonte: Adaptado de Thoemen; Irle; Sernek (2010).

Conforme mostrado na Figura 1, no grupo dos laminados estão os painéis sanduíches e aqueles fabricados apenas com lâminas. O painel sanduíche é aquele que utiliza lâminas na capa e contra-capas e miolo de outro material. Nos compósitos feitos apenas por lâminas estão o compensado e o painel LVL (*Laminated Veneer Lumber*), cuja diferença entre eles está na disposição de colocação das lâminas durante sua fabricação. No compensado essas lâminas são colocadas em defasagem uma em relação a outra, enquanto no LVL são colocadas no mesmo sentido (ANSELL, 2015).

Segundo Oliveira e Freitas (1995), para os compostos laminados há a vantagem em relação aos compostos de partículas e fibras de os produtos obterem melhores propriedades, pois para a produção do mesmo são utilizadas as melhores toras, de diâmetros mais elevados, de maior concentricidade e com menos defeitos.

Já Stark, Cai e Carll (2010) destacaram como principal qualidade para os painéis compensados, em relação aos painéis particulados ou fabricados de fibras, o fato de possuir pouco inchamento irreversível quando exposto ao ambiente com umidade.

3.2 PAINÉIS COMPENSADOS

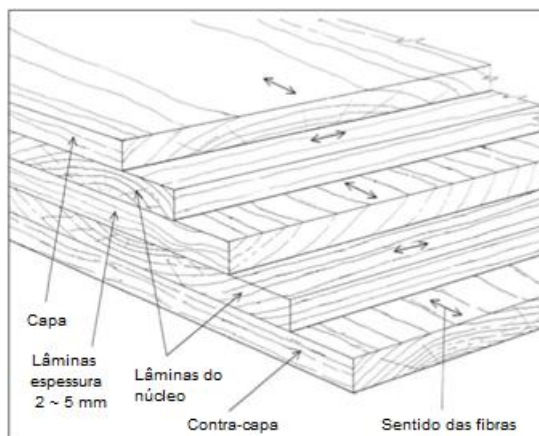
Os painéis de madeira compensada começaram a ser produzidos no começo do século XX sob a perspectiva de trazer um grande avanço, ao produzir através de toras de madeiras painéis de grandes dimensões com uma relativa redução dos custos e um melhor aproveitamento da madeira (ZENID, 2009).

A produção industrial em âmbito mundial data de 1913, mas no Brasil a produção dos primeiros painéis compensados remete-se ao Sul do país na década de 1940, onde a matéria-prima para sua fabricação era a madeira proveniente da *Araucária angustifolia* (PRATA, 2006).

O compensado é compreendido como a sobreposição de lâminas finas de madeira ligadas efetivamente por adesivos, onde sua disposição se dá na forma de que duas lâminas consecutivas sejam coladas ortogonalmente. São comercializados na forma de placas, sendo as dimensões 2200 mm x 1220 mm e 2200 mm x 1600 mm as mais comuns.

A espessura varia, entre 4 a 40 mm, podendo ser feito o aumento de duas formas distintas: usando lâminas mais grossas ou aumentando o número de lâminas. A vantagem de aumentar o número de lâminas está na produção de painéis mais homogêneos, embora o número de lâminas também aumente os custos de produção (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010). Painéis com 3 a 11 lâminas são geralmente encontrados (Figura 2).

Figura 2 - Forma de construção do painel compensado.



Fonte: Adaptado de Hoadley (2000).

A forma como esse painel é construído, sempre em números ímpares de lâminas, confere a este derivado sua principal virtude: a estabilidade dimensional (HOADLEY, 2000; THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

Kollmann e Côté (1984) citam que a madeira de desdobro tem suas limitações em relação à absorção de água e, conseqüentemente, suas variações dimensionais, pois apresentam em suas três direções (tangencial, radial e longitudinal) propriedades físicas e mecânicas diferentes, sendo esta variação menor nos painéis compensados, devido a defasagem das lâminas.

Thoemen, Irle e Sernek (2010) explicam que se um pedaço seco de madeira estiver imerso em água, ele inchará mais na direção tangencial e menos no longitudinal, com valores intermediários no sentido radial. Os valores de inchamento nas três direções variam de espécie para espécie, mas é tipicamente em torno de 20: 12: 1 (tangencial: radial: longitudinal).

Os mesmos autores ainda afirmam que é essa anisotropia dimensional que torna necessário que os compensados sejam fabricados em número ímpar, criando assim um painel simétrico em espessura, conforme ilustrado na Figura 3, onde se observa um compensado de sete lâminas que a parte inferior é uma imagem espelhada da metade superior.

Figura 3 - Mostra a linha de simetria de um painel compensado de 7 lâminas.



Fonte: Adaptado de Thoemen; Irle; Sernek (2010).

Embora os valores de resistência e rigidez sejam menores quando comparados a madeira sólida, os painéis compensados apresentam custo aceitável e uma resistência relevante quando comparada com o seu peso reduzido, o que o torna interessante como elemento estrutural (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

3.3 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS COMPENSADOS

Nesta seção serão apresentadas as etapas de produção de um painel compensado de maneira geral, iniciando do preparo das toras.

3.3.1 Preparo das toras

A madeira a ser utilizada para a produção do painel é descascada, pois a casca, além de não poder ser cortada na forma de lâmina, pode conter substâncias que prejudicam o corte no processo de laminação. Para o descascamento são usados descascadores do tipo cilindro e descascador de anel (IWAKIRI, 2005; THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

A maioria das fábricas realiza o descasamento juntamente com seccionamento, processo que torna as toras menores, de acordo com a dimensão da lâmina de corte. O descascamento dessas toras diminui o tempo que a mesma passa no aquecimento, sabendo-se que a casca é um isolante térmico (IWAKIRI, 2005).

No aquecimento, as toras são postas em tanques contendo vapor ou água quente ou uma combinação dos dois, com a finalidade de deixar a madeira mais amolecida e com maior plasticidade, o que propiciará a produção de lâminas com menor ocorrência de quebras, tornando-as mais lisas e em forma de uma fita contínua (OLIVEIRA; FREITAS, 1995; THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

A temperatura pela qual a tora deve ser submetida para o amolecimento das fibras depende de sua densidade e da estrutura anatômica. Deve-se ter o cuidado de não aquecer a madeira demasiadamente de forma a deixá-la muito macia, o que resultará na retirada das fibras ao invés do corte (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

Para densidades baixas, as toras não necessitam de cozimento. Para densidades aparentemente médias entre 400 a 540 kg.m⁻³, como do *Pinus taeda*, a temperatura mais favorável é de 60 °C. Já madeiras mais densas devem ser submetidas a uma temperatura na faixa de 93 °C (UMAÑA; BRITO, 2004).

Baldwin (1995) cita algumas das vantagens proporcionadas pelo aquecimento ou cozimento das toras: aumento do volume de lâminas por tora, aumento da qualidade das lâminas,

redução do tamanho das facas, redução do desperdício da cola, lâminas mais finas, maior resistência da lâmina à tração perpendicular as fibras, diminuição da pressão da barra de pressão e aumento de produção.

Alguns cuidados, entretanto, devem ser atentados com relação ao calor aplicado nas toras. Altas temperaturas da água combinadas com períodos de aquecimentos curtos causam gradientes de temperatura que são prejudiciais, tornando as camadas exteriores que foram mais bem aquecidas mais macias, enquanto as camadas interiores frias mantem-se mais duras. Essa situação poderá causar problemas como a quebra da faca ao atingir as regiões mais frias (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

Segundo o mesmo autor, o tempo de aquecimento deve ser longo o suficiente para formação de gradiente de temperatura que não deve ultrapassar 6° C. Lembra ainda que o tempo de aquecimento é proporcional ao diâmetro quadrado da tora. Se o diâmetro é duplicado, o tempo de aquecimento é quadruplicado.

3.3.2 Laminação

A operação de laminação é o processo cujo corte se dá de forma perpendicular às fibras, onde a aresta de corte encontra-se de forma paralela às fibras, com o intuito de formarem-se folhas de madeira ou lâminas de madeira.

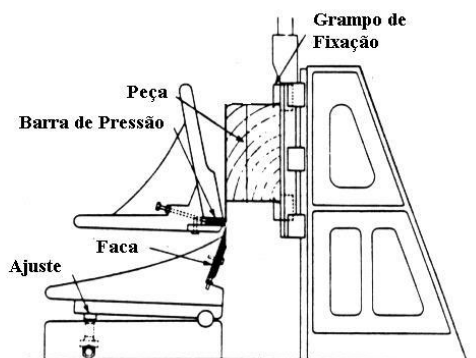
O processo de obtenção das lâminas pode ocorrer através de faqueadeiras ou tornos laminadores de acordo com a necessidade de uso e aplicação (IWAKIRI, 2005).

A laminação que utiliza da faqueadeira tem como objetivo a produção de lâminas decorativas. A tora é transformada em blocos ou pranchões para o faqueamento, o qual é feito de forma descontínua, com cortes planos. As espessuras obtidas são de 0,6 a 1,5 mm sendo aplicadas para o revestimento.

O equipamento utilizado neste caso é a plaina fatiadeira onde a peça de madeira é fixada sobre uma mesa na qual se translada na direção vertical ou horizontal com relação à faca (ferramenta de corte), num avanço direcional perpendicular às fibras da madeira, que tangencia as regiões dos anéis de crescimento da tora (Figura 4).

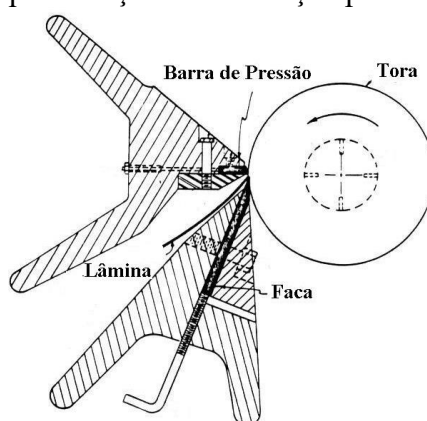
O método mais comum para a produção de lâminas, entretanto, é através do torno rotativo (Figura 5), uma forma mais rentável de se obter a lâmina de forma contínua e ausente de defeitos (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

Figura 4 - Representação de operação de laminação por fatiamento.



Fonte: Adaptado de Kollmann; Kuenzi; Stamm (1975) conforme citado por Gonçalves (2016).

Figura 5 - Representação da laminação por torneamento rotativo.



Fonte: Adaptado de Koch (1971?) conforme citado por Gonçalves (2016).

O torno laminador é composto por garras em semi-eixos, os quais giram e avançam a tora contra a faca no sentido radial até um limite de diâmetro determinado da peça (GONÇALVES, 2016). A função da barra de pressão mostrada na Figura 5 é evitar alguns defeitos mais comuns nesse tipo de laminação como o fendilhamento ou o arrancamento de fibras (WATAI, 1987).

A rotação do torno pode variar sua velocidade, na faixa de 50 a 300 rpm. Quanto à velocidade de corte sua variação pode ser de 30 a 50 m.min⁻¹ (IWAKIRI, 2005).

3.3.3 Secagem das lâminas

A finalidade da secagem é reduzir o teor de umidade para um intervalo de valores ao qual a lâmina se torna adequada para sua colagem.

A secagem pode ser feita em local aberto em lugares que há um clima favorável. As lâminas são posicionadas de modo que o ar possa circular livremente sobre as superfícies. Existe ainda a possibilidade dessa secagem ser feita em estufa onde as lâminas são empilhadas e colocadas em uma câmara de condicionamento. O terceiro método é o mais comum na

indústria, composto de um secador mecânico, no qual a lâmina é transportada por rolos, correias, cabos ou esteiras. Nesses últimos métodos a secagem é realizada em minutos (BALDWIN, 1995).

Segundo Iwakiri (2005), o teor de umidade das lâminas secas deve ser compatível com a resina que será utilizada na colagem. Para o uso da resina fenol-formaldeído o teor de umidade deve estar entre 6 a 8%.

Para uma secagem uniforme em toda a extensão da lâmina e ausência de defeitos é importante que haja uma perfeita operação dos secadores (OLIVEIRA; FREITAS, 1995). Os defeitos mais comuns nesta etapa são as ondulações que são causadas principalmente se as lâminas forem secas muito rapidamente e em temperatura muito alta. Esse tipo de defeito pode ser removido em alguns casos com vapor de condicionamento (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

Os mesmos autores ainda citam que além das ondulações, a secagem também pode alterar a superfície da lâmina para que a cola não molhe bem, isso em virtude dos extrativos migrarem para a superfície e alterar o ângulo de contato entre a cola e a superfície da lâmina. Alternativamente, com o aumento da temperatura há o aumento da cristalinidade na madeira, em geral, associado à reorganização e reorientação das moléculas de celulose que dificultam também a penetração do adesivo (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010; SILVA, 2012).

Assim, as características ideais que a lâmina deve alcançar ao final da secagem são: teor de umidade uniforme, ausência de ondulações e depressões, ausência de fendas ou rachaduras, superfície em ótimas condições para a colagem, sem mudanças na cor da lâmina, contração mínima, endurecimento reduzido e ausência de colapso (IWAKIRI, 2005).

Dentre os secadores mecânicos, os mais utilizados são os secadores de rolos e os secadores de esteira. Os secadores de rolos são mais eficientes devido ao contato direto com as lâminas ocorrendo à troca de calor por condução que é mais eficiente do que por convecção (PAAJANEN et al., 2012).

Os rolos possuem tipicamente 100 mm de diâmetro. Já nos secadores de esteira são utilizados jatos de ar a velocidades de 1000 – 1500 m.min⁻¹ que é soprado verticalmente sobre a superfície da lâmina e que estimulam a secagem rápida enquanto as lâminas são alimentadas no secador de forma contínua (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

3.3.4 Preparação das lâminas

Após a obtenção das lâminas as mesmas passam por uma etapa de classificação visual, cujas normas atuais contêm uma variedade de notas e variam conforme espécie. O mais comum

é utilizar lâminas de melhor qualidade na capa do painel e as de qualidade inferior na região interna e de contra placa (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

Na manufatura de painéis compensados de grandes dimensões, deve-se realizar a junção das lâminas mais estreitas, devendo formar as camadas mais internas de compensado. Nesta etapa da produção é importante que se tenha a eliminação de defeitos, como os nós, furos e outros, os quais podem ser sobrepostos com pedaços sadios do mesmo material (OLIVEIRA; FREITAS, 1995). Segundo Thoemen, Irle e Sernek (2010) apesar de muitos se surpreenderem com essa situação, o desempenho do painel formado por lâminas unidas não é significativamente afetado.

Segundo Iwakiri (2005), os principais métodos empregados para a junção da lâmina são três: o primeiro é a colagem superficial com fios de *nylon* que contém a resina *hot-melt* a base de etileno vinil acetato, aplicado com um rolo compressor com uma temperatura elevada, transversalmente ou longitudinalmente em “zigue-zague”. O segundo método é a colagem na superfície através de fitas adesivas aplicadas longitudinal ou transversalmente. O terceiro método é o de colagem lateral, aplicando o adesivo em lâminas decorativas e em seguida aplicados com o rolo compressor aquecido.

3.3.5 Aplicação de adesivo

No que diz respeito aos modos de aplicação dos adesivos nas superfícies das lâminas, os aplicadores podem ser de rolos, spray, cortina ou extrusão, sendo o aplicador de rolo o mais utilizado (BALDWIN, 1995; OLIVEIRA E FREITAS, 1995). Independente do aplicador utilizado, deve ser controlado a quantidade de adesivos a ser aplicado por 1m² de área (gramatura) que vai depender do tipo de resina, espessura da lâmina e da formulação (IWAKIRI, 2005).

Segundo Frihart e Hunt (2010), a quantidade de adesivo a ser aplicada deve levar em consideração a uniformidade sobre a lâmina, para que ele espalhe uniformemente na prensagem. O adesivo é produzido em um misturador ou bateadeira, de acordo com a formulação e a quantidade de cada componente levando-se em consideração a capacidade do misturador. Essa mistura contém componentes como a resina, extensor, água, catalisador, aditivos químicos, entre outros (IWAKIRI, 2005).

Fatores como a espécie da madeira, qualidade superficial da lâmina, adesivo usado, teor de umidade, temperatura, tempo de montagem devem ser consideradas no cálculo da quantidade de adesivo nesta etapa do processo (IWAKIRI, 2005).

A gramatura varia de 140 a 240 g.m⁻² por linha de cola, sendo, algumas vezes citado como linha de cola dupla (e assim o dobro do valor dado na sentença anterior) em decorrência dos rolos aplicarem adesivo em ambas as faces da lâmina de uma só vez (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

3.3.6 Montagem do painel

Conforme explicado anteriormente, o painel é montado com um número ímpar de lâminas, que por sua vez, são dispostas de maneira cruzada para que cada camada tenha uma lâmina com grã perpendicular à lâmina adjacente. A composição do compensado é formada sequencialmente por capa, lâminas do miolo e lamina de contracapa (IWAKIRI, 2005).

3.3.7 Pré-prensagem do painel

Para Prata (2006), a etapa de pré-prensagem tem o objetivo de transferir a resina de uma camada para a outra, o que melhora a distribuição da linha de cola e diminui o tempo que o painel passaria na prensagem a quente, além de facilitar o manuseio dos painéis e o carregamento da prensa. O controle de pressão é muito importante, pois grandes pressões podem afetar a espessura final do painel.

A pré-prensagem é influenciada pelas características do adesivo, temperatura do ambiente, a madeira utilizada, temperatura da lâmina, gramatura adotada, teor de umidade, pressão e o tempo em que é prensado (IWAKIRI, 2005).

3.3.8 Prensagem do painel

A prensagem do painel compensado pode ser feita de duas maneiras: à frio e à quente. Adesivos termofixos curam-se mais rapidamente com aplicação de calor na prensagem e, para tanto, são utilizados pratos aquecidos, onde no espaço entre dois pratos são inseridos painéis montados. A prensa aquecida deve ser carregada o mais rápido possível afim de que não ocorra a secagem do adesivo (OLIVEIRA e FREITAS, 1995).

As variáveis que devem ser controladas no ciclo de prensagem são: pressão, temperatura e ciclo de prensagem. A pressão tem a finalidade de transferência do adesivo e contato dos pratos com o painel. O nível da pressão está ligado com a densidade da madeira, gramatura do adesivo e característica da superfície da lâmina. As pressões variam de 6 a 10 kgf.cm⁻² para

madeiras de baixa densidade e de 10 a 15 kgf.cm⁻² para as de alta densidade (OLIVEIRA; FREITAS, 1995; IWAKIRI, 2005).

A temperatura está ligada com a cura da resina. Para poliuretana utiliza-se a temperatura na faixa de 60° a 90 °C e para fenol-formaldeído de 130° a 140°C. Já o tempo de prensagem relaciona-se diretamente com o tempo de cura do adesivo. As temperaturas mais baixas possuem menor risco de formação de bolhas, porém tempos de prensagem mais longos (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

3.4 ADESIVOS PARA USO EXTERIOR

Os adesivos são substâncias cuja utilização possuem a ação de unir materiais por meio do contato entre suas superfícies. No segmento madeireiro desempenham um papel importante na utilização eficiente dos recursos ao permitir que quase todos os tipos e tamanhos de madeira sejam convertidos em produtos funcionais (FRIHART, 2015).

Estima-se que mais de dois terços dos produtos de madeira, hoje no mundo, são totalmente, ou parcialmente, unidos utilizando-se um tipo de adesivo (PIZZI; MITTAL, 2011 apud CAVALHEIRO, 2014). Na maioria das vezes são obtidos misturando-se resinas e polímeros que se tornam sólidos por intermédio da secagem, podendo ser encontrados na forma de pós, granular, pastosa ou líquida. (IWAKIRI, 2005; COGNARD, 2005 apud WILCZAK, 2014).

Os adesivos sintéticos são os mais empregados pela indústria madeireira por serem mais fortes, rígidos e duráveis que a madeira, e por ter geralmente uma resistência à água muito maior do que os adesivos tradicionais de polímeros naturais, além de não permitir ação de microrganismos (OLIVEIRA; FREITAS, 1995; CAMPOS; LAHR, 2004).

De acordo com Frihart e Hunt (2010) os seguintes pontos têm importância central nos atributos dos adesivos: resistência, durabilidade, compatibilidade entre o adesivo e a superfície da madeira, tempo necessário para a cura do adesivo, consistência ou viscosidade do mesmo, se há algum tipo de mistura a qual deve ser realizada no adesivo, como água ou catalisadores, pressão e temperatura necessárias, composição, cores e propriedades finais, facilidade e simplicidade de uso, custo e a segurança em relação ao ser humano e o meio ambiente.

Outro aspecto importante a ser analisado é a quantidade da resina a ser utilizada no processo de colagem, uma vez que este componente apresenta elevado custo no processo produtivo e seu preço varia conforme o tipo de resina. Nesse sentido busca-se uma otimização entre custo e benefício (IWAKIRI, 2003 apud LIMA, 2011).

Segundo Pizzi (1994), os adesivos podem ser classificados em termoplásticos ou termorrígidos. Os termoplásticos são polímeros de cadeia longa que amolecem e fluem quando aquecidos e depois endurecem novamente após o resfriamento, podendo citar como exemplo o PVA (Poliacetato de Vinila), PVC (Policloreto de Vinila) e *hot-melts*. Em geral, esses adesivos possuem menor resistência ao calor e umidade e carga estática de longo prazo se comparado aos polímeros termorrígidos.

Já os polímeros termorrígidos ou termofixos são aqueles que sofrem alterações químicas irreversíveis quando curados, e no reaquecimento, eles não amolecem novamente e, por esse motivo, são excelentes adesivos estruturais. Eles formam polímeros reticulados que podem ter alta resistência mecânica, resistência à umidade e a outros produtos químicos, e são rígidos o suficiente para suportar cargas estáticas altas e de longo prazo sem deformar. Fenol-formaldeído, resorcinol-formaldeído, melamina-formaldeído, uréia-formaldeído, isocianato e adesivos epóxi são alguns exemplos desse tipo de adesivo.

O fenol-formaldeído é atualmente o adesivo mais usado na fabricação do compensado, todavia, o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona tem sido estudado como alternativa aos painéis estruturais, por sua alta resistência à umidade e que o torna apto para uso exterior. Na indústria nacional de painéis, seu uso está restrito a produção comercial de madeira laminada colada (CALIL NETO, 2014).

3.4.1 Fenol-Formaldeído (FF)

O fenol-formaldeído foi introduzido na década de 1930, sendo uma resina que possui alta resistência à umidade quando comparada às outras resinas empregadas na produção de painéis e, por esse motivo, suas aplicações se dão em ambientes exteriores (SELLERS, 1985).

É a principal resina usada na América do Norte, cuja aplicação no continente está concentrada nos painéis estruturais e em *waferboards*. O adesivo fenol-formaldeído, quando devidamente curado, é mais durável do que a própria madeira. Os pontos negativos de seu uso são os altos preços, a cor escura da linha de cola e a baixa umidade requerida das lâminas no processo de produção (BALDWIN, 1995).

Ela pode ser encontrada de diferentes formas: na forma líquida ao serem produzidas com extensores e enchimentos, em sua forma de filme quando inseridas diretamente nos laminados e em pó quando são aplicados diretamente no material (FRIHART; HUNT, 2010). A cura ocorre entre 120 a 160°C, podendo atingir até 200°C. Outras características importantes a serem analisadas nos adesivos são teor de sólidos na faixa de 48 a 51%, pH entre 11 e 13 e sua viscosidade atingindo valores de 300 a 600 cP (IWAKIRI, 2005).

Os adesivos fabricados a partir do fenol-formaldeído se originam em resinas fenólicas sintéticas, sendo seu custo o principal ponto negativo. O fenol tem como matéria-prima o petróleo, enquanto o formaldeído o gás natural. É o adesivo usado para painéis de madeira fabricados com lâminas de coníferas, OSB, HD e MDP (FRIHART; HUNT, 2010).

3.4.2 Resina poliuretana à base de mamona (PU)

Os poliuretanos tiveram seu início de desenvolvimento por Otto Bayer e colaboradores, no começo da década de 1940 (VILAR, 2005). Sua produção pode derivar tanto do petróleo como de fontes naturais, obtidos de fontes renováveis, como os óleos vegetais provenientes da soja, milho, amendoim, girassol, mamona, entre outros (PETROVIC, 1999 apud SILVA, 2003).

A preocupação com o meio ambiente e com a saúde humana trouxeram uma tendência mundial na busca por produtos biodegradáveis, derivados da biomassa e que poluam menos. Essa tendência levou a pesquisa dos poliuretanos à base de mamona a vários ramos (ARAÚJO, 1992; DIAS, 2005).

Fornazieri Jr (1986) atesta que a *Ricinus communis*, como é denominada cientificamente, conhecida como mamona é uma das oleaginosas mais importantes em regiões de clima tropical e por isso é abundante no Brasil. Conhecida no território brasileiro como carrapateira, mamoneira e rícino, a mamona é chamada na Inglaterra de “*castor beans*” e nos Estados Unidos como “*castor seed*”.

Para a obtenção do óleo de mamona é empregada a técnica de extração das sementes, sendo dois os principais métodos: prensagem das sementes ou extração por solventes (RITTNER, 1996). Para Azevedo e Beltrão (2007), o método de maior eficiência é o *expeller* (pressão contínua), onde existem roscas helicoidais sem fim, forçando a semente passar por um orifício, causando a extração do óleo. Tal método tem 45% de aproveitamento sendo que o restante é extraído por contato com solventes. Segundo Silveira et. al. (2004), o hexano é um dos solventes orgânicos mais eficientes para a extração do óleo de mamona.

A resina poliuretana desenvolvida no Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo, situada em São Carlos, é originada a partir da sintetização dos polióis e, derivado da planta *Ricinus communis* e do pré-polímero, derivado do petróleo. A porcentagem do pré-polímero e do polioliol varia para definir menor ou maior dureza da resina, a qual é importante para o uso do catalisador correto com o fim de aumentar a velocidade de reação (DIAS, 2005).

A cura de tal adesivo é realizada em temperatura ambiente, a qual pode ser acelerada com aplicação de temperatura de 60 a 90°C. Estima-se que quando a resina poliuretana à base de

mamona for colocada em larga escala no mercado poderá alcançar preços satisfatórios (REMADE, 2003).

O adesivo de poliuretano confeccionado à base de óleo de mamona possui vantagens competitivas em relação aos outros polímeros, essencialmente por três fatores: suas propriedades mecânicas são elevadas quando comparadas aos polímeros derivados do petróleo, não possui solvente em sua composição, e o principal, é obtido através de uma matéria-prima renovável (LAHR, 2004 apud WILCZAK, 2014).

Há muitas pesquisas em desenvolvimento com a utilização desta resina, que segundo Garcia e Rech (2011) apresenta alta eficiência na colagem de grandes peças de madeira, tais como: pontes, coberturas, vigas, portas, janelas, entre outras.

Além disso, estudos relacionados a produção de painéis de madeira com resina poliuretana tem avançado nos últimos anos, se concentrando em torno do painel OSB (SOUZA et al., 2014; FERRO et al., 2015, 2016, 2018 e BARBIRATO et al., 2018), do MDP (FERRO et al., 2014a, 2014b; ZAU et al., 2014), e mais recentemente do painel híbrido (MACEDO et al., 2019), produzido a partir de lamelas e partículas, se mostrando em todas essas pesquisas uma alternativa viável para substituição do fenol-formaldeído.

Já em relação ao painel compensado, tem-se o trabalho feito por Dias (2005) que estudou a utilização da resina poliuretana na manufatura desses painéis com a espécie *Eucalyptus saligna* e verificou, com base nos valores exigidos por normas nacionais e internacionais e comparados também com o valor da literatura, que esses painéis atenderam as exigências, apresentando equivalência e até superioridade aos valores determinados.

3.5 TRATAMENTO TÉRMICO

A madeira possui algumas limitações que podem afetar sua aplicação para determinados fins e, como em qualquer outro material, suas propriedades podem ser melhoradas realizando algumas modificações em sua estrutura, podendo ser por meio de processos químicos ou através do tratamento térmico.

Em termos comerciais, a modificação térmica é a que mais tem evoluído, devido principalmente a pressões sociais e restrições legais impostas pelos governos à utilização de produtos químicos tóxicos. Aliado a esse fator, soma-se escassez de madeiras duráveis e pressão ambiental para o uso de madeira de reflorestamento, além da viabilidade dos custos, que faz as indústrias se voltarem cada vez mais para esse método considerado mais sustentável (ESTEVES; PEREIRA, 2009; FANG et al., 2013; LUO; CAO; WANG, 2013; DOMINGOS et al., 2018).

As primeiras pesquisas a respeito da termorretificação foram realizadas nos anos de 1990 na Finlândia, França e Holanda, sendo os trabalhos divulgados pela instituição *Technical Research Centre of Finland*, na Finlândia – VTT (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

O tratamento térmico ou termorretificação, como também é chamado, consiste em um processo no qual a energia sob a forma de calor é submetida à madeira em temperaturas não superiores as que provocam a degradação dos componentes químicos essenciais: lignina, celulose e hemicelulose (BRITO et al., 2006).

Segundo dados da literatura, a lignina degrada-se em uma faixa de temperatura variante de 250 à 500 °C, as hemiceluloses, o componente mais sensível ao calor, na faixa de temperatura entre 225 à 325 °C, enquanto a celulose entre 305 e 375 °C. A intenção do processo, portanto, é que haja a termodegradação controlada, conservando em parte os teores dos componentes fundamentais (SHAFIZADEH, 1985 apud SANTOS, 2014 e PROTÁSIO et al., 2012).

A temperatura e duração do tratamento térmico geralmente variam de 160 a 280 °C e de 15 min a 24 h, sendo que a escolha desses parâmetros vai depender das propriedades finais desejadas da madeira termicamente modificada (KORKUT; HIZIROGLU, 2009).

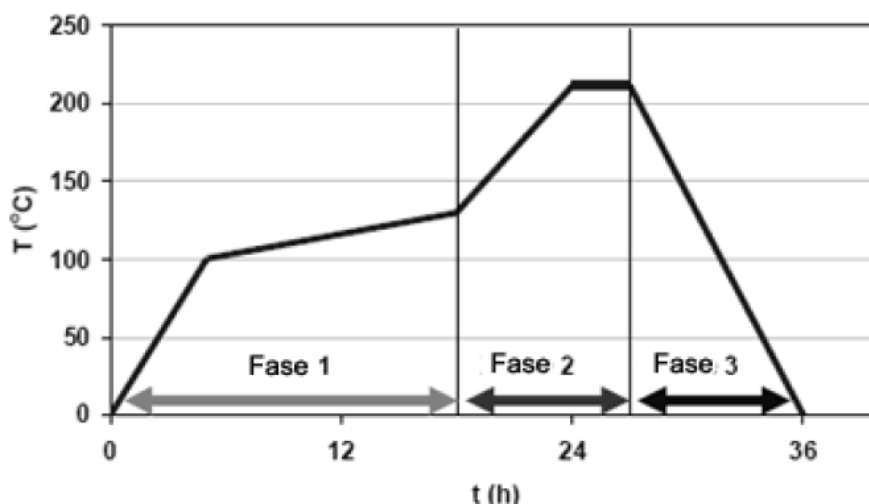
Diferente do processo químico que resulta no aumento de massa e mantém a madeira em seu estado inchado, a modificação térmica é sempre acompanhada de uma perda de massa, mantendo a madeira em seu estado mais contraído em razão da remoção dos grupos hidroxila da madeira (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

No mercado, diferentes metodologias de termorretificação foram desenvolvidas com fins industriais, dentre as quais pode-se citar o *Thermowood* na Finlândia, o *Plato Wood* na Holanda, o *Oil Heat Treatment* – OHT na Alemanha e o *Bois Perdure e Rectification* na França. Novos processos de tratamento térmico também surgiram em outros países, como o WTT (*Wood Treatment Technology*) na Dinamarca e o *Huber Holz* na Áustria (*Huber Holz*) (MILITZ, 2002).

Os processos diferem-se entre si com relação ao tipo de equipamento utilizado, parâmetros de tratamento, como tempo e temperatura, ou mesmo atmosfera (úmida ou seca) que, por sua vez, vão depender das propriedades finais desejadas da madeira termicamente modificada (HILL, 2006). A Figura 6 é um exemplo de diagrama de aquecimento adotado no processo *ThermoWood*.

O sistema Thermowood é, provavelmente, o processo de tratamento mais bem sucedido na Europa, já que a Finlândia é a maior produtora de madeira termorretificada do mundo. As principais espécies utilizadas são o pinheiro silvestre (*Pinus sylvestris*) e abeto (*Picea abies*) (SANDBERG e KUTNAR, 2016). Segundo o fabricante, o tempo de vida da madeira tratada pode chegar até 30 anos (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003).

Figura 6 – Diagrama temperatura x tempo do processo ThermoWood.



Fonte: FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION (2003).

As modificações ocorridas no interior da madeira com o tratamento térmico melhoram propriedades como ataques biológicos, permeabilidade, qualidade nos tratamentos de superfície e estabilidade dimensional (BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006; KARTAL; HWANG; IMAMURA, 2007; KORKUT; BUDACKI, 2010; ZHANG et al., 2017).

A madeira submetida a tratamento térmico é recomendada para usos em ambientes interiores e exteriores, mas que não necessitem de elevadas solicitações mecânicas. É comumente empregada na confecção de instrumentos musicais, cercas, portões, móveis, batentes de portas, paredes à prova de som, terraços, decks de barco, entre outras aplicações (ARAÚJO et al., 2012).

3.5.1 Modificações nas propriedades de resistência e rigidez

A termorretificação da madeira tem influência nas propriedades mecânicas onde verificam diferenças dos resultados mecânicos encontrados por alguns autores. A discrepância, entretanto, pode ser explicada devido aos parâmetros utilizados no tratamento térmico bem como as diferentes espécies de madeira sujeitadas ao tratamento (ARAÚJO et al., 2012).

De modo geral, grande parte das propriedades mecânicas sofrem efeito negativo na termorretificação. Em um estudo realizado por Korkut, Akgül e Dündar (2008), foi encontrada diminuição na resistência à compressão paralela à grã, MOR, MOE, dureza Janka, resistência ao impacto e tração perpendicular à grã da termorretificação da madeira de *Scots pine*, demonstrando que o aumento no tempo e na temperatura de tratamento resultou em maiores decréscimos destas propriedades.

Silva (2012) analisou as propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* a temperaturas de 160 a 260 °C e concluiu que com o aumento da temperatura há perdas cada vez maiores para o MOR. Em relação ao MOE este sofreu menores influências do tratamento, sendo que para temperaturas entre 180° e 200°C uma tendência de melhores resultados foram observados. Kačíková et al. (2013) estudando outra espécie de conífera, observou que o MOR decresceu drasticamente a temperaturas acima de 160°C quando teve início a degradação térmica das hemiceluloses. Antes dos 160 °C, entretanto, as mudanças no MOR e no MOE foram insignificantes.

Nazerian, Ghalehno e Kashkooli (2011) ao analisarem a influência da termorretificação sobre as propriedades de painéis LVL, constataram que o MOR e MOE destes painéis decresceram significativamente, mostrando que o tratamento térmico promove uma diminuição na resistência da madeira e, conseqüentemente, no painel LVL. O mesmo ocorrendo nos estudos conduzidos por Ferreira (2017) com o painel compensado.

Em outra pesquisa com painel compensado, Costa e Menezzi (2017) ao tratar termomecanicamente a madeira de paricá pelo método termomecânico verificaram mudanças positivas das propriedades mecânicas, sobretudo em decorrência de sua densificação, levando a um aumento de 27,5% e 51,8% do MOR após os tratamentos a 120°C e a 150°C, respectivamente, e com o MOE e o cisalhamento na linha de cola não variando estatisticamente. Alterações nas propriedades físicas, entretanto, também foram observadas como o aumento do inchamento e absorção de água.

3.5.2 Modificações nas propriedades físicas

As principais modificações observadas com a termorretificação estão relacionadas ao ganho e perda de umidade, susceptibilidade a degradação biológica e maior resistência às intempéries que são as principais limitações da madeira. O melhor desempenho consiste na alteração do comportamento higroscópico, oferecendo ganhos em termos da estabilidade dimensional (BORGES; QUIRINO, 2004; POUBEL et. al, 2013).

A diminuição da higroscopicidade da madeira por meio da termorretificação se deve, principalmente, a perda do grupo hidroxílico (OH) presentes nos constituintes da parede celular, especialmente as hemiceluloses que possuem um caráter mais hidrofílico (WEILAND; GUYONNET, 2003). Essa redução da higroscopicidade pode chegar em até 60% comparada à madeira não tratada (TJEERDSMA; MILITZ, 2005).

Além das hemiceluloses, as mudanças que ocorrem na cristalinidade da celulose e as reações de reticulação e condensamento da lignina também são fatores a serem considerados,

pois dificultam a acessibilidade dos grupos hidroxila às moléculas de água, formando uma rede mais firme e inelástica de ligações cruzadas (*cross-linking*). A diminuição da capacidade de expansão das microfibrilas de celulose impede a parede celular de inchar, diminuindo capacidade de absorver água, reduzindo o PSF - ponto de saturação das fibras (TJEERDSMA e MILITZ, 2005; BOONSTRA e TJEERDSMA, 2006; YILDIZ, GEZER E YILDIZ, 2006; ESTEVES et al., 2008; POUBEL et al. 2013).

A redução do PSF foi estudado por Reppellin e Guyonnet (2005) para as espécies *Beech* (*Fagus sylvatica*) e *Pinus maritime* (*Pinus pinaster*) através de análises químicas pela calorimetria diferencial de varredura (DSC) revelando que o menor ponto de saturação das fibras se deu principalmente devido ao aumento da porcentagem de extrativos em razão da degradação dos polissacarídeos.

Já para produtos derivados de madeira, como os painéis compensados, as conclusões não estão restritas apenas a matéria-prima e suas modificações químicas, já que estes produtos sofrem também a influência do adesivo e da tecnologia usada na produção (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

3.5.3 Modificações na superfície e propriedades de colagem

A qualidade de colagem é determinada pelo tipo de adesivo utilizado, as condições e parâmetros do processo de colagem e pela madeira, neste caso, especificamente pelas características de sua superfície (DUNKY, 2003).

Alguns trabalhos incidiram sobre a influência da termorretificação neste processo concluindo que o tratamento pode afetar a capacidade dos adesivos de se espalhar sob a superfície da madeira de forma negativa, assim como a melhor estabilidade dimensional das peças tratadas, pode melhorar o desempenho da colagem ao reduzir as tensões de contração e inchamento na linha de cola (SERNEK et al., 2008).

Pincelli, Brito e Corrente (2002) avaliaram a influência da termorretificação sobre a colagem da madeira de *Eucalyptus saligna* em diferentes temperaturas e adesivos e os resultados demonstraram que não houve influência sobre a colagem da madeira.

Por outro lado, trabalhos como de Hakkou et al. (2003) concluíram que a temperaturas entre 40 e 260°C durante 8 horas, fez com que a molhabilidade da madeira diminuísse drasticamente começando em 135°C, aumentando ligeiramente depois com o aumento da temperatura. Além disso, tanto a distribuição do adesivo sob a superfície, quanto a sua penetração na estrutura porosa da madeira podem ser afetados devido ao caráter menos higroscópico que a madeira adquire (KARIZ e SERNEK, 2010).

Vernois (2000), Pétrissans et al. (2003), Sernek et al. (2004), Follrich et al. (2006) e Gérardin et al. (2007) concluíram que a molhabilidade da madeira com água é reduzida após o tratamento térmico, sendo o motivo dessa redução a diminuição do número de sítios de absorção primária (grupos OH), que tornam a superfície da madeira tratada termicamente hidrofóbica, menos polar e, significativamente, repelente à água e que impedem os adesivos de molhar adequadamente a superfície.

Sernek et al. (2008) estudaram a ligação de produtos não-tratados, e madeira tratada termicamente com diferentes adesivos e concluíram que o tratamento térmico afetou a resistência ao cisalhamento e a delaminação da madeira laminada dependendo do sistema adesivo utilizado para colagem. O pH baixo e a molhabilidade da madeira tratada termicamente foram propostos como sendo as principais razões para esta diferença.

Liu et al. (2018) ao estudarem as propriedades do painel compensado produzido com lâminas de *Tsuga heterophylla termorretificadas* a temperatura de 170 °C utilizando três diferentes tipos de adesivos verificaram que, independente do adesivo, o tratamento térmico reduziu a higroscopicidade das lâminas e melhorou o desempenho de colagem devido as alterações da superfície da madeira durante esse processo.

Em relação ao painel compensado, Ferreira et al. (2018) a partir do teste de molhabilidade concluíram que as superfícies das lâminas se tornaram mais hidrofóbicas com o aumento da temperatura, e isso influenciou na diminuição da resistência ao cisalhamento na linha de cola no teste mecânico. Eles realizaram a termorretificação em temperaturas que variaram de 160 a 200°C produzidos com lâminas de *Pinus* e adesivo fenol-formaldeído.

Testes de molhabilidade também foram realizados por Podgorski et al. (2000) ao termorretificarem amostras de madeira de abeto por uma hora em temperaturas que variaram de 60 a 200 °C. Os autores verificaram que o ângulo de contato com a água aumentou acentuadamente à medida que se aumentou a temperatura de tratamento (de 65° na testemunha, para 145° na madeira termorretificada a 200°C). As mudanças na molhabilidade em temperaturas mais baixas foram atribuídas à migração de extrativos lipofílicos para a superfície.

Para Hse e Kuo (1988), o comportamento dos extrativos solúveis em água é a principal explicação para esse fenômeno, já que os mesmos durante o tratamento térmico são transportados para a superfície com a água e se depositam como sólidos quando a água evapora, fenômeno este que ocorre também durante a secagem. A quantidade transportada vai depender da temperatura utilizada e das condições de umidade relativa.

Para Podgorski et al. (2000) a presença de extrativos na superfície tem consequência nas propriedades de adesão, podendo formar a chamada superfície inativa ou contaminada, bloqueando os sítios de reação e impedindo uma adequada umectação do adesivo e contato

adesivo-madeira, prejudicando a adesão e reduzindo a resistência da colagem. Os extrativos de madeira podem ser polares e não polares, sendo que, os não polares são os principais responsáveis pela baixa molhabilidade da superfície de madeira por adesivos à base de água.

A termorretificação causa ainda mudanças na rugosidade superficial, sendo a mesma relacionada, principalmente, a forma de preparação de sua superfície (corte, aplainamento, lixamento) e as características anatômicas da madeira (vasos, células radiais, canais de resina, etc). Uma elevada rugosidade pode afetar tanto positivamente a colagem, pois há uma maior área de superfície de contato e regiões para ancoramento e fixação dos adesivos, como negativamente, devido à redução no contato entre as superfícies a serem coladas (CRUZ, 2006).

Unsal e Ayrilmis (2005) observaram redução da rugosidade superficial da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* com o aumento da temperatura e do tempo de termorretificação, chegando a diminuição de 27,9% da rugosidade para a temperatura de 180 °C e 10 horas de tratamento. Salca e Hiziroglu (2014) também chegaram à mesma conclusão para diferentes espécies de madeira, ou seja, o aumento da temperatura e do tempo do tratamento térmico diminui a rugosidade superficial.

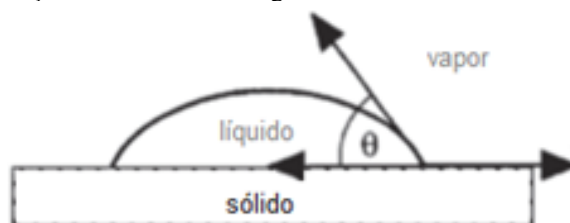
3.5.4 Modificações na molhabilidade

A molhabilidade é definida como a capacidade de um líquido estabelecer um contato íntimo com a superfície da madeira, sendo esta característica influenciada pela energia livre da superfície (JENNINGS, 2003). É medida através do ângulo de contato e diversos fatores influenciam como: tratamentos químicos ou físicos da superfície, desgaste por ataques biológicos, tipo de corte, condições de armazenamento, desgaste por ataques biológicos, limpeza, métodos de secagem, idade, posição anatômica, entre outros (GINDL et al., 2004).

Com auxílio de equipamentos específicos, essas medidas de ataque do ângulo de contato são simples de serem realizadas, sendo de grande interesse pois indicam de forma rápida e macroscopicamente propriedades hidrofóbicas da superfície (MYERS, 1990).

O ângulo de contato pode ser medido através de dois métodos: estático e dinâmico. O método estático ou goniômetro refere-se à medição direta da tangente do ângulo de contato no ponto de contato trifásico (vapor, líquido e sólido) no perfil da gota séssil. A Figura 7 apresenta o ângulo de contato, θ , de uma gota de um líquido em uma superfície sólida.

Figura 7 - Ilustração das medidas de ângulo de contato e da tensão superficial

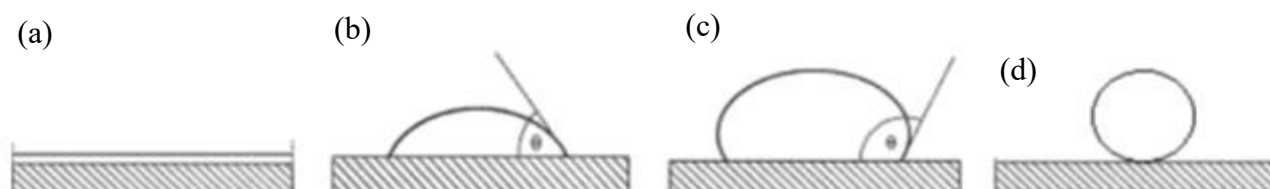


Fonte: Adaptado de Luz; Ribeiro; Pandolfelli (2008).

O “telescópio-goniômetro”, como também é chamado, consiste numa base horizontal para montar a amostra sólida ou líquida, uma pipeta de micrômetro para formação da gota do líquido, uma fonte de iluminação e um telescópio equipado por uma ocular (YUAN; LEE, 2013).

O comportamento que uma gotícula assume quando depositada sobre uma superfície pode variar em diversas geometrias, formando maior ou menor ângulo de contato (Figura 8). Para fins didáticos, a superfície é considerada molhável quando o ângulo de contato (θ) fica abaixo de 90° , sendo esta superfície chamada hidrofílica. Se este ângulo for zero a superfície é molhante, neste caso a superfície é chamada de superhidrofílica. Quando θ é maior que 90° , a superfície não molha, sendo então chamada de hidrofóbica (MYERS, 1990).

Figura 8 - Comportamento da gota sobre a superfície: (a) ângulo de contato zero (espalhamento total) (b) ângulo de contato abaixo de 90° (c) ângulo de contato maior que 90° (d) Ângulo de contato igual à 180° .



Fonte: Adaptado de Luz; Ribeiro; Pandolfelli (2008)

As indústrias têm investido muito, atualmente, nas superfícies super-hidrofóbicas que são aquelas que se conseguem ângulos de contato que facilmente superam 150° , cujas superfícies onde uma gotícula consegue inclusive rolar pela simples inclinação da superfície em ângulo inferior a 5° (WU; SHI, 2006).

Com o aprimoramento da tecnologia, diversos pesquisadores têm conseguido aumentar os ângulos de contato através da manipulação química da superfície ou alterando a rugosidade ou tamanho da gotícula (YOSHIMITSU, 2002; BRANDON, 2003; DORRER; RUEHE, 2004; MCHALE; SHIRTCLIFFE; NEWTON, 2004; ZHANG; HAN, 2007).

A medição dos ângulos de contato apesar da sua simplicidade e o fato que é necessária pequena quantidade de líquido e substratos superficiais pequenos (YUAN; LEE, 2013),

apresenta a desvantagem de poder sofrer interferências ser contaminada com extrativos e resíduos da superfície alterando as relações de energia da região de contato (WALINDER; JOHANSSON, 2001).

Outra desvantagem é a dependência do operador para que haja uma boa precisão do método (YUAN; LEE, 2013), uma vez que sua porosidade favorece o espalhamento ou absorção parcial do líquido (LIPTÁKOVÁ; KÚDELA, 1994).

3.6 CONSIDERAÇÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tratamento térmico da madeira e dos painéis à base de madeira tem obtido a atenção de pesquisadores nos últimos anos por ser mostrar como uma proposta de preservação sustentável em comparação aos tratamentos químicos tradicionalmente realizados. Painéis estruturais de madeira utilizam adesivos à base de formaldeído, que apresenta risco cancerígeno, sendo importante que seja desenvolvido estudo com adesivos livres de formaldeído, visando o bem-estar dos colaboradores na indústria e do usuário final.

O desenvolvimento de produtos sustentáveis que garantam a maior durabilidade dos materiais, aliado ao uso de adesivos livres de formaldeídos surgem como uma proposta promissora no estudo de painéis à base de madeira, incluindo o painel de madeira compensada, de modo a minimizar os impactos gerados por produtos inadequados ambientalmente.

A partir da revisão da literatura pôde-se perceber que a madeira tratada termicamente sofre alterações em seus componentes fundamentais, cujas mudanças se devem à degradação dos polissacarídeos da madeira, sendo as hemiceluloses o primeiro componente a ser atingido com o calor. Mudanças na qualidade superficial da madeira também ocorrem e estão relacionadas, principalmente, a migração dos extrativos até a superfície.

As modificações em seus constituintes fundamentais fazem com que a madeira sofra variações nas suas propriedades físicas e mecânicas, sendo que as propriedades físicas, de uma maneira geral, são melhoradas, enquanto, algumas vezes, verifica-se perda de resistência nas propriedades mecânicas. Em sua forma natural a madeira apresenta características hidrofílicas, porém, quando submetidas ao tratamento térmico ela pode ter a sua superfície modificada e se tornar menos hidrofílicas.

A extensão das alterações térmicas vai depender de fatores como espécie de madeira, temperatura final do tratamento, duração do tratamento térmico e, no caso dos painéis, das técnicas de produção. A madeira tratada termicamente possui menor rugosidade que pode afetar tanto positivamente, quanto negativamente, ao alterar a superfície de contato e regiões para ancoramento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a produção dos compensados foram usadas lâminas com 2,3 mm de espessura (nominal) e da espécie *Pinus taeda* doadas pela empresa Miraluz – Indústria e Comércio de Madeiras Ltda., produtora de compensados, localizada no município de Sengés /PR. As lâminas foram seccionadas nas dimensões de 450 x 450 mm, sendo que tais dimensões foram determinadas a partir da limitação da pré-prensa e prensa envolvidas no processo de manufatura desses painéis.

A variável considerada nesta pesquisa foi a forma de tratamento e temperaturas de termorretificação. Foram analisados os tratamentos em prensa e em estufa em três diferentes temperaturas (160, 180 e 200°C), conforme nomenclatura apresentada no Quadro 1.

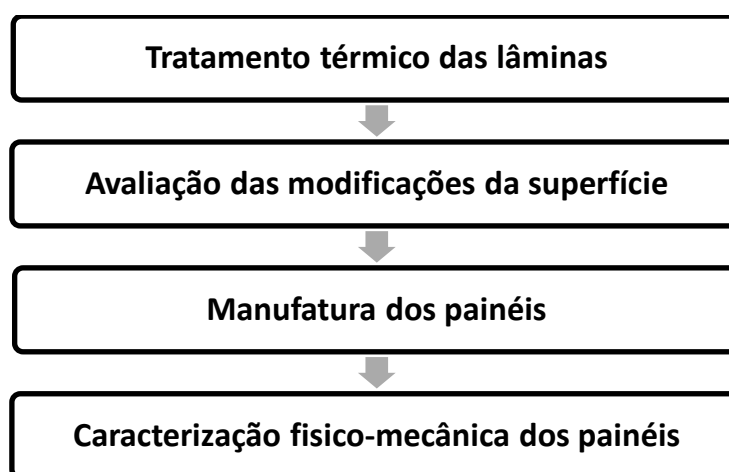
QUADRO 1 – Definição e características dos tratamentos propostos.

Tratamento	Forma de tratamento	Temperatura de tratamento (°C)
T0 - Controle	Sem tratamento	Sem tratamento
TE160	Estufa	160
TE180		180
TE200		200
TP160	Prensa	160
TP180		180
TP200		200

Fonte: Autoria própria.

Após separação das lâminas para compor as camadas dos painéis de madeira compensada, a pesquisa seguiu o procedimento mostrado na Figura 9:

Figura 9 - Etapas do experimento para a produção dos painéis.



Fonte: Autoria própria.

A seguir estão detalhadas todas as etapas envolvidas no desenvolvimento do presente estudo.

4.1 TRATAMENTO TÉRMICO DAS LÂMINAS

O tratamento térmico das lâminas foi efetuado no Laboratório de Painéis do Campus da UNESP de Itapeva. O tratamento foi realizado a partir de dois diferentes métodos de termorretificação, sendo um em estufa e outro em prensa.

O tratamento em estufa foi realizado em equipamento da marca Marconi – modelo MA 035/5. A Figura 10 mostra a disposição das lâminas em estufa elétrica.

Figura 10 - Condicionamento das lâminas dentro da estufa para o tratamento térmico.

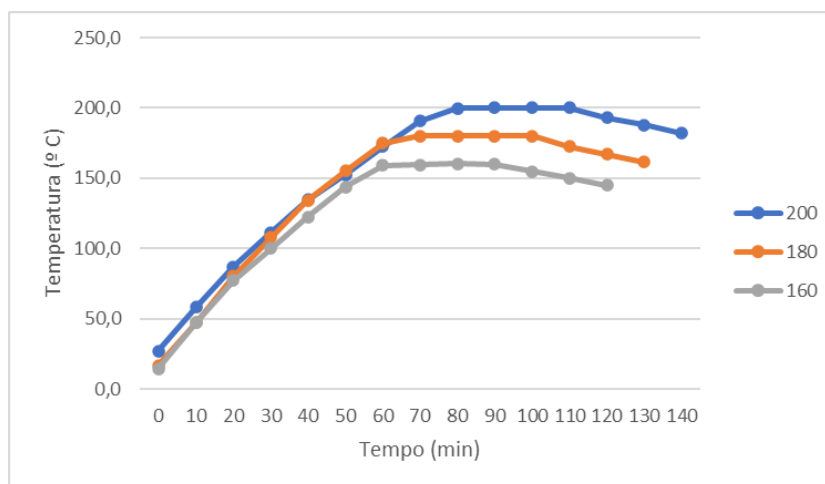


Fonte: Autoria própria.

O processo em estufa consistiu basicamente em três fases. Na primeira fase ocorreu o aumento da temperatura no interior da estufa a uma taxa de $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$. A segunda consistiu no tratamento térmico, propriamente dito, pelo período de 30 min em temperatura constante. A terceira etapa foi definida como o resfriamento após o desligamento da estufa e aberta para retirada das garantindo melhor equilíbrio das mesmas com o meio, evitando deformações e distorções. A Figura 11 mostra o diagrama do processo de termorretificação para as fases 1 e 2, indicando a velocidade de aquecimento do processo (fase 1) e o tempo de termorretificação propriamente dito (fase 2).

No tratamento térmico em prensa foi utilizada a prensa hidráulica termo-aquecida da Marca Hdral-Mac - modelo PHH-80T, sendo que as lâminas foram submetidas individualmente à aplicação de pressão de 50 bar (apenas para garantir o contato dos pratos aquecidos com as superfícies das lâminas) e temperatura inerente a cada tratamento térmico por um tempo total de 30 min com a prensa previamente aquecida na temperatura desejada (Figura 12).

Figura 11 - Diagrama do processo de termorretificação em estufa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12 - Prensa utilizada no tratamento térmico das lâminas.

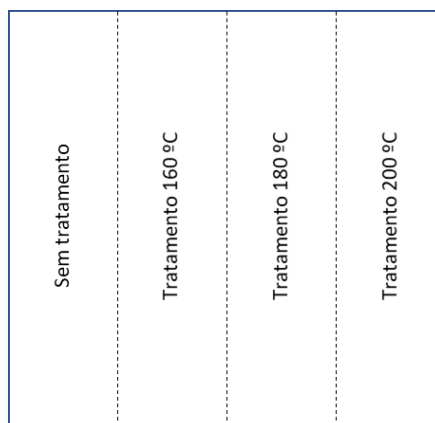


Fonte: Autoria própria.

4.1.1 Retirada de amostra para análise

Duas lâminas foram retiradas aleatoriamente do lote sem tratamento para realização de testes específicos para investigação das alterações do tratamento térmico na superfície da lâmina. Essas duas lâminas foram seccionadas em quatro partes e cada uma das partes foi conduzida ao tratamento, conforme mostrado na Figura 13. Uma das lâminas foi destinada ao tratamento em prensa e a outra para estufa.

Figura 13 – Seccionamento da lâmina de amostragem para investigação das alterações de superfície.



Fonte: Autoria própria.

4.2 ANÁLISE QUÍMICA E SUPERFICIAL DAS LÂMINAS

Para investigação dos efeitos da temperatura sobre a superfície das lâminas foram realizados os seguintes ensaios no material de amostragem: análise do teor de extrativos totais, análise do perfil de rugosidade superficial e teste de molhabilidade.

4.2.1 Teor de extrativos totais

Esta análise foi realizada em triplicata e teve o intuito de verificar a mudança na quantidade de teor de extrativos ocorrida na termorretificação, já que os extrativos influenciam diretamente na qualidade superficial da madeira, afetando as propriedades de colagem. O ensaio foi realizado conforme a norma TAPPI T-257 (2012)

Inicialmente, as partes de lâminas foram convertidas em partículas processadas em um moinho de facas tipo *Willey* e, posteriormente classificadas, onde foram selecionadas as partículas de na faixa de 40 a 60 mesh. O processo de determinação dos extrativos totais consistiu em outras três etapas, a primeira foi a extração com tolueno:etanol (2:1 em volume), a segunda a extração com etanol a 95% e a terceira a extração com água quente em banho-maria (Figura 14).

O material foi alojado no sifão do tubo de extração *Soxhlet* (Figura 14a) e então, iniciou-se o processo de extração, por 5 horas, com a utilização de 850 mL de uma solução de tolueno:etanol. O mesmo processo foi realizado na segunda etapa com uma solução de 850 mL de etanol, por mais 5 horas.

Figura 14 – Etapas do processo de extração: (a) extração com etanol-tolueno e etanol e (b) material sendo preparado para o banho-maria.



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, foi realizada a última etapa da extração que consistiu na abertura do sachê e seu conteúdo retirado com o auxílio de uma pisseta e depositado em um béquer com 150 mL de água destilada (Figura 14b). Então, os béqueres foram levados ao banho-maria, à temperatura de 98°C, por uma hora.

Após o processo de extração, foi feita a lavagem do material, no qual se utilizou de água deionizada e um sistema de filtração por bomba a vácuo. As amostras foram então levadas à estufa por 24 horas para retirada da umidade, e após esse tempo, foram medidas novamente as suas massas.

Finalmente, com a massa inicial das partículas e com a massa livre de extrativos, pôde-se obter o teor de extrativos totais das amostras, através da Expressão (1).

$$TET = \left(\frac{m_{inicial} \times m_{LE}}{m_{inicial}} \right) \times 100 \quad (1)$$

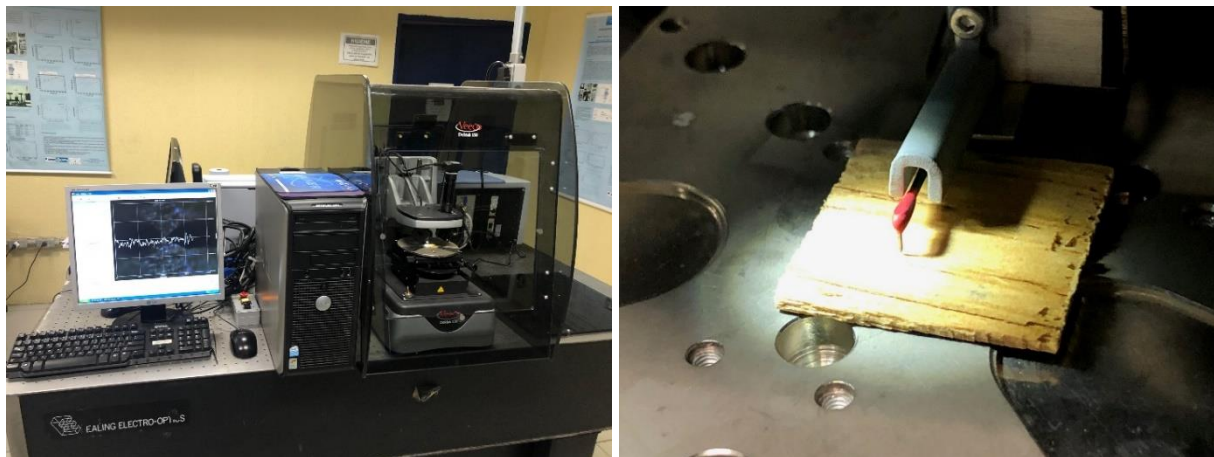
Onde: TET é o teor de extrativos totais, em porcentagem; $m_{inicial}$ é a massa inicial absolutamente seca da amostra, em gramas; m_{LE} é a massa da amostra livre de extrativos, em gramas.

4.2.2 Perfil de rugosidade superficial

As análises de rugosidade superficial foram realizadas no Laboratório de Plasmas Tecnológicos (LaPTec) do Instituto de Ciências e Tecnologia da UNESP/Câmpus de Sorocaba

e, foram realizados de acordo com a norma NBR ISO 4287:2002 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2002) com o rugosímetro de agulha da marca Veeco, modelo Destak 150 (Figura 15).

Figura 15 - Rugosímetro de agulha *Veeco* realizado em lâminas de *pinus*.



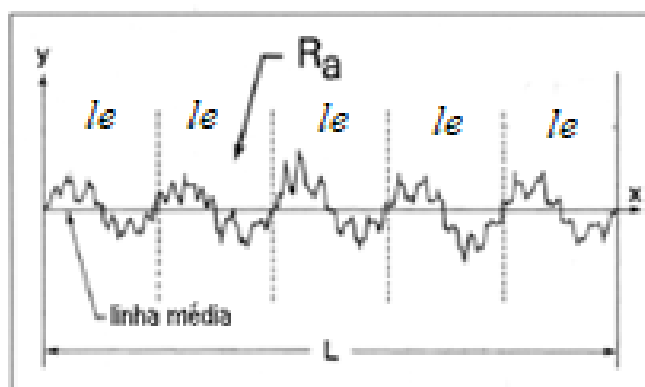
Fonte: Autoria própria.

As medições foram realizadas em cinco pontos da amostra no sentido perpendicular à grã, sendo medido o parâmetro de amplitude da rugosidade aritmética ou média (R_a) determinado em função da linha média do perfil de rugosidade de acordo com a Expressão (2):

$$R_a = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L |y| dx \quad (2)$$

A linha média é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem que é chamado de *cut-off* (l_e). A distância percorrida pelo apalpador (L) deverá ser igual a 5 (l_e) (Figura 16) acrescido da distância para atingir a velocidade de medição e a parada do apalpador.

Figura 16 - Ilustração da avaliação da rugosidade



Fonte: Adaptado de Oliveira (2009).

As amostras utilizadas possuíam dimensões de 50 x 50 mm e o comprimento de medição adotado foi de 10 mm com comprimento de amostragem (*cut-off*) de 2 mm, tomando-se o cuidado de obter os parâmetros de rugosidade a partir de áreas livres de defeitos produzidos pelo preparo da superfície ou irregularidade da grã.

4.2.3 Análises de ângulo de contato

As análises de ângulo de contato foram realizadas no Laboratório de Plasmas Tecnológicos (LaPTec) do Instituto de Ciência e Tecnologia da UNESP/Câmpus de Sorocaba utilizando o goniômetro digital da *Ramé-Hart instruments co* (Figura 17a). O sistema era composto por três componentes: (1) uma mesa de suporte para fixação da amostra; (2) um sistema de vídeo com câmera, um sistema óptico, um prisma padrão de formato para determinação do ângulo de contato, uma fonte de iluminação e abertura; e (3) um sistema dosador que pode ser controlado manualmente ou com o auxílio do software.

Figura 17 - Goniômetro digital Ramé-Hart instruments co.



Fonte: Autoria própria.

O ensaio foi realizado em ambiente com temperatura de 20 ± 2 °C e adicionou-se uma gota de água de aproximadamente 30 μ L sobre a superfície da madeira (Figura 17b), utilizando-se uma seringa com capacidade de 1 mL.

As amostras utilizadas possuíam dimensões de 50 x 50 mm com espessura de 2,3 mm, ou seja, a própria espessura da lâmina, sendo produzidas três gotas na superfície e feitas as medições de ângulo diretamente pelo software. O tempo total de cada medição foi de 120 s com leituras a cada 0.02 s totalizando 600 leituras por amostra.

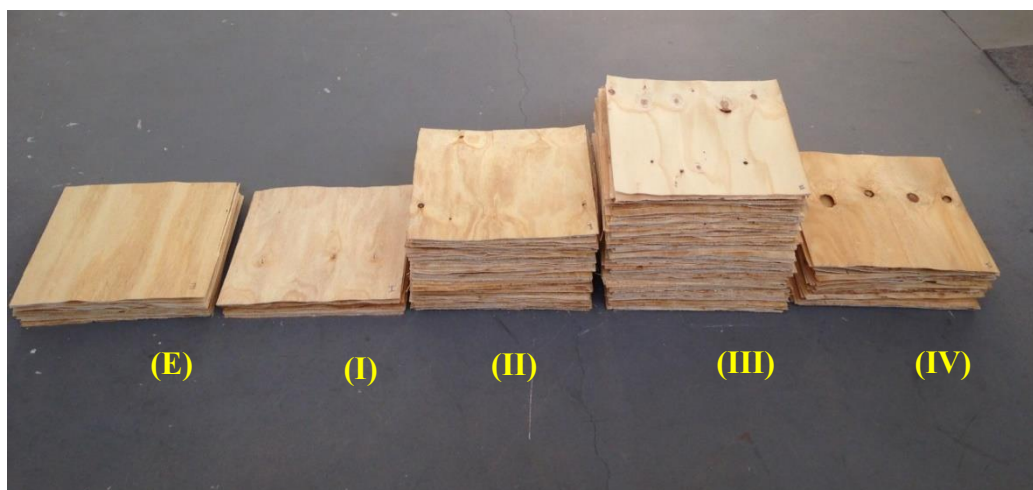
4.3 PRODUÇÃO DOS PAINÉIS

Os painéis foram produzidos no Laboratório de Painéis do Câmpus da UNESP de Itapeva – SP nas dimensões finais de 450 mm de comprimento por 450 mm de largura por 12 mm de espessura. Para cada tipo de painel foram produzidos quatro painéis com cinco lâminas, além do painel testemunha (T0), cujas lâminas usadas na produção não sofreram qualquer tratamento, resultando em vinte e oito painéis compensados produzidos ao todo. A seguir será detalhado o processo de manufatura desses painéis.

4.3.1 Classificação das lâminas

Inicialmente foi realizada a classificação visual das lâminas obtidas com base na norma ABNT NBR ISO 2426-3:2007. As classes desta norma são entendidas como sendo as lâminas que se encaixam na classe E (especial) aquelas nas quais os defeitos da madeira como nós, fendas, bolsões de resina, irregularidades, fungos, são praticamente ausentes, enquanto que a classe IV representa as lâminas com predominância de defeitos (Figura 18).

Figura 18 - Lâminas de madeira classificadas.



Fonte: Autoria própria.

Os painéis confeccionados seguiram a relação de disposição de lâminas apresentadas na Figura 19. Tal disposição foi realizada considerando o princípio de menor solicitação mecânica na região central do painel devido à linha neutra, que consiste na região entre a transição da região tracionada e comprimida quando submetida à flexão.

Figura 19 - Separação das lâminas conforme classificação visual e tratamento.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Secagem das lâminas

A etapa seguinte consistiu na secagem das lâminas que ocorreu em estufa com uma temperatura $60 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 h para dar início então à produção propriamente dita dos painéis.

4.3.3 Aplicação do adesivo e montagem do painel

A resina usada foi aplicada manualmente com a utilização de uma espátula plástica, buscando sempre a uniformidade na distribuição da quantidade de adesivo em cada lâmina (Figura 20). A gramatura utilizada foi de 395 g.m^{-2} com a linha de cola dupla (tendo apenas uma das faces das lâminas preenchidas com o adesivo). Com isso, para cada linha de cola foram usados 80,0 g por linha de cola e, conseqüentemente, 320,0 g de adesivo por painel produzido.

Figura 20 - Aplicação do adesivo.



Fonte: Autoria própria.

Conforme os adesivos foram sendo aplicados e espalhados nas lâminas, estas foram sobrepostas umas às outras, respeitando sempre a posição ortogonal das lâminas (Figura 21).

Figura 21 - Montagem do painel



Fonte: Autoria própria.

4.3.4 Pré-prensagem e prensagem dos compensados

Após a aplicação da resina em cada lâmina, o conjunto foi levado à pré-prensagem em uma prensa manual a frio, por um período de 15 min e com uma pressão de 2 kgf.cm^{-2} (Figura 22). Tal procedimento foi realizado a fim de uniformizar o adesivo para cada uma das lâminas, permitindo a transferência para a face da lâmina sem adesivo e facilitando sua transferência para o carregamento até a prensa aquecida.

Figura 22 – Pré-prensagem do painel.



Fonte: Autoria própria.

Após a pré-prensagem, o painel foi prensado à quente, na prensa aquecida tipo PHH 80T (Hidral-Mac). No mesmo foi aplicado uma pressão de 6 kgf.cm^{-2} a uma temperatura de 90°C por um tempo de 10 min. Este tempo de prensagem foi dividido em 3 ciclos, cada um deles com 3 min de duração e adicionado 30 s para o alívio de pressão entre os ciclos, havendo, por fim, a finalização do painel através da cura do adesivo (Figura 23).

Figura 23 - Paineis confeccionados.



Fonte: Autoria própria.

Ao final deste período os painéis passaram por um acabamento, esquadrejando suas bordas e retirando os corpos de prova para os ensaios físicos e mecânicos, os quais serão descritos a seguir.

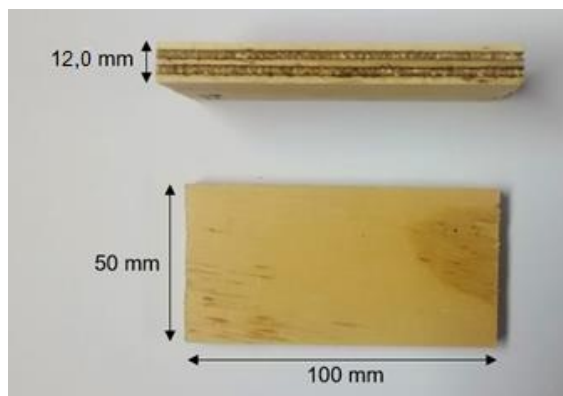
4.4 ENSAIOS FÍSICOS

Dos painéis depois de confeccionados foram retirados os corpos de prova necessários para a realização dos ensaios físicos: massa específica aparente, teor de umidade, absorção e inchamento em espessura.

4.4.1 Massa específica aparente

Para determinação da massa específica aparente os métodos utilizados foram baseados na ABNT NBR 9485:2011. Os corpos de prova retirados dos compensados de cada tipo de tratamento e adesivo tiveram dimensões de 100 x 50 x 12,0 mm. Para cada tratamento foram feitos 9 corpos de prova (Figura 24).

Figura 24 - Corpo de prova para massa específica aparente.



Fonte: Autoria própria.

As dimensões dos corpos de prova para a largura e o comprimento foram tomadas através de um paquímetro digital com uma precisão de 0,01 mm e para a espessura foi usado um micrômetro digital com precisão de 0,001 mm, medindo-se três vezes cada dimensão. Para cada uma das dimensões foram calculadas as médias aritméticas. Ao se obter os dados a massa específica aparente foi encontrada através da Expressão (3):

$$\rho = \frac{m}{c \times l \times e} \quad (3)$$

Onde:

ρ – massa específica aparente, base seca, em g.cm⁻³;

m – massa do corpo de prova livre de umidade, em g;

c – comprimento médio do corpo de prova, em cm;

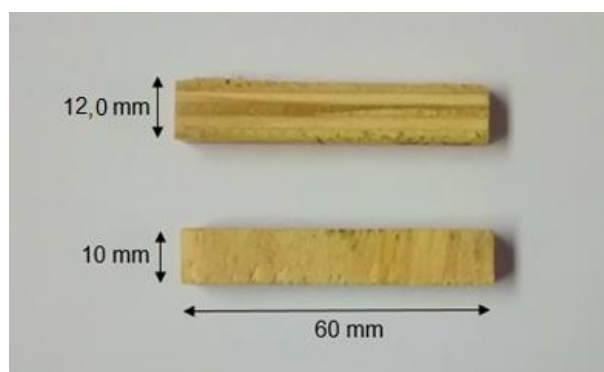
l – largura média do corpo de prova, em cm;

e – espessura média do corpo de prova, em cm.

4.4.2 Inchamento em espessura

Para os testes de inchamento de espessura foi utilizada a ABNT NBR 9535:2011. Foram produzidos seis corpos de prova para esse teste, tendo dimensões de 60 x 10 x 12,0 mm (Figura 25). O comprimento, conforme a norma prescreve, foi usinado no sentido ortogonal às fibras de madeira e as peças foram lixadas para retirar as imperfeições do corte.

Figura 25 - Corpo de prova para inchamento em espessura.

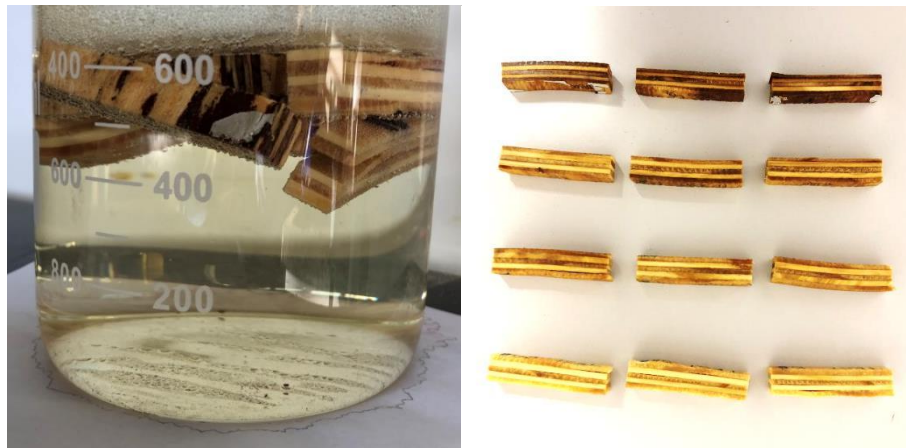


Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram divididos em duas séries de três, uma série, conforme a norma indica, é de controle. Com o micrômetro digital com precisão de 0,001 mm foi medida a

espessura do centro de cada um dos corpos de prova. Para a série de controle as amostras foram secas em estufa com uma temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ que ao final de 24 horas nessa condição tiveram suas espessuras novamente medidas. Outros três corpos de prova foram colocados em água e submergidos por 24 horas, os quais ao término deste período tiveram suas espessuras medidas (Figura 26). Os mesmos corpos de prova deste procedimento foram submetidos em uma estufa de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, também pelo mesmo período de 24 horas. Ao fim desse período as espessuras, novamente foram medidas.

Figura 26 - Corpos de prova no ensaio de inchamento.



Fonte: Autoria própria.

Após essas medições foram calculados a recuperação em espessura através da Expressão (4) e inchamento mais recuperação da espessura pela Expressão (5):

$$R = \left(\frac{e_1 \times e_5}{e_2 \times e_3} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

R – recuperação em espessura, em %;

e1 – soma das espessuras iniciais dos corpos de prova usadas no controle, em mm;

e2 – soma das espessuras dos corpos de prova usados no controle e secos em estufa, em mm;

e3 – soma das espessuras iniciais dos corpos de prova antes da imersão em água, em mm;

e5 – soma dos corpos de prova depois da imersão em água, em mm.

$$IR = \left(\frac{e_1 \times e_4}{e_2 \times e_3} - 1 \right) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

IR – inchamento mais recuperação da espessura, em %;

e4 – soma das espessuras dos corpos de prova depois da imersão em água e secos em estufa, em mm.

Por fim, calculou-se a porcentagem de inchamento pela diferença entre os valores obtidos para inchamento mais recuperação da espessura (IR) e recuperação da espessura (R).

4.4.3 Teor de umidade

A ABNT NBR 9484:2011 é a norma para a determinação do teor de umidade de painéis compensados. As dimensões dos corpos de prova para este procedimento foram iguais as dimensões dos corpos de prova usados para o procedimento de massa específica aparente, pela exigência de os mesmos serem de pelo menos 10 g. Foram usados 9 corpos de prova em cada condição. A massa de cada corpo de prova foi medido em uma balança digital com uma precisão de 0,01 g, logo após a pesagem foram levados à estufa com uma condição de 103 ± 2 °C, até que os mesmos obtivessem uma massa constante. O teor de umidade foi calculado através da seguinte Expressão (6):

$$TU = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

TU – teor de umidade, em %;

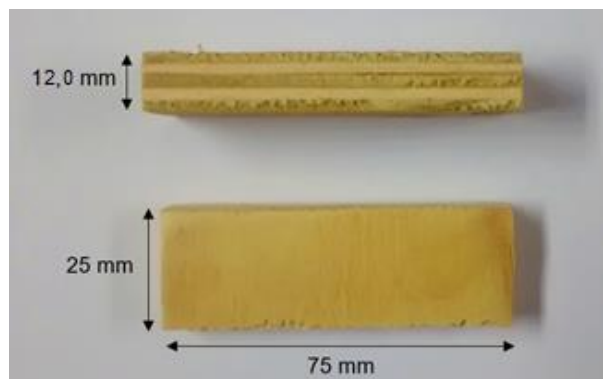
mu – massa úmida, em g;

ms – massa seca, em g.

4.4.4 Absorção de água

O teste físico de absorção de água foi baseado na ABNT NBR 9486:2011. As dimensões dos corpos de prova produzido foram de 75 x 25 x 12,0 mm (Figura 27), especificados desta forma pela norma, os mesmos tiveram o comprimento ortogonal à direção das fibras das lâminas da parte externa. Foram seis o total de número de amostras utilizadas neste teste.

Figura 27 - Corpo de prova para absorção de água.



Fonte: Autoria própria.

Primeiramente, as amostras foram pesadas em balança digital com precisão de 0,01 g para determinação de sua massa inicial. Os mesmos corpos de prova foram submergidos em água por um período de 24 horas e foram pesados ao final desse período para determinar a massa final. Para calcular a absorção de água dos corpos de prova foi utilizada a seguinte Expressão (7):

$$Ab = \frac{M_f - M_i}{M_i} \quad (7)$$

Onde:

Ab – quantidade de água absorvida, em %;

Mf – massa final do corpo de prova, em g;

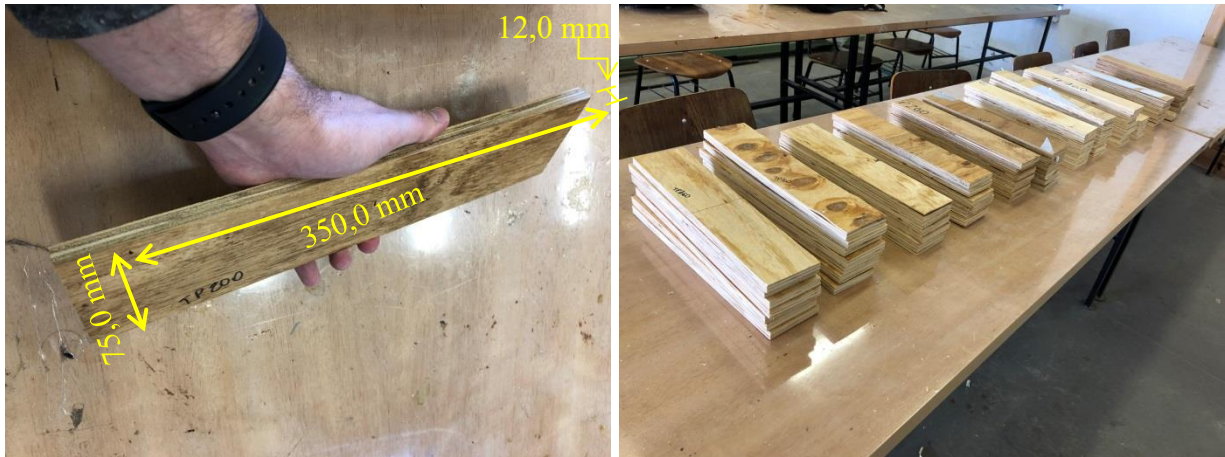
Mi – massa inicial do corpo de prova, em g.

4.5 ENSAIOS MECÂNICOS

4.5.1 Flexão estática paralela e perpendicular

Para o ensaio de flexão estática, tanto no sentido paralelo como no sentido perpendicular das fibras das lâminas externas do compensado, a norma utilizada foi a ABNT NBR 9533:2013. Os corpos de prova foram fabricados nas medidas de 350 x 75 x 12,0 mm (Figura 28). Foram retirados no mínimo cinco corpos de provas para cada direção das fibras (paralelas e perpendiculares) em relação às lâminas externas nos compensados.

Figura 28 - Corpo de prova para flexão estática paralela e perpendicular.



Fonte: Autoria própria.

Foram medidas as espessuras de cada corpo de prova há 25 mm da borda e do centro do corpo de prova com um o paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. As larguras dos corpos de prova também foram determinadas com o mesmo paquímetro digital.

A distância entre os centros dos apoios foi de 300 mm. Posicionou-se o corpo de prova sobre os apoios de forma com que o plano de sua maior superfície permanecesse na horizontal e seu eixo do comprimento ficasse perpendicular aos eixos de apoio e ao cutelo (Figura 29).

Figura 29 - Ensaio de flexão estática paralela e perpendicular.



Fonte: Autoria própria.

A carga aplicada pelo cutelo foi constante a velocidade calculada pela seguinte Expressão (8):

$$V = \frac{k \times L^2}{6 \times e} \quad (8)$$

Onde:

V – velocidade de carregamento, em m.s⁻¹;

k – taxa de deformação de fibra, a qual é igual a 0,00005;

L – distância entre apoios (vão), em mm;

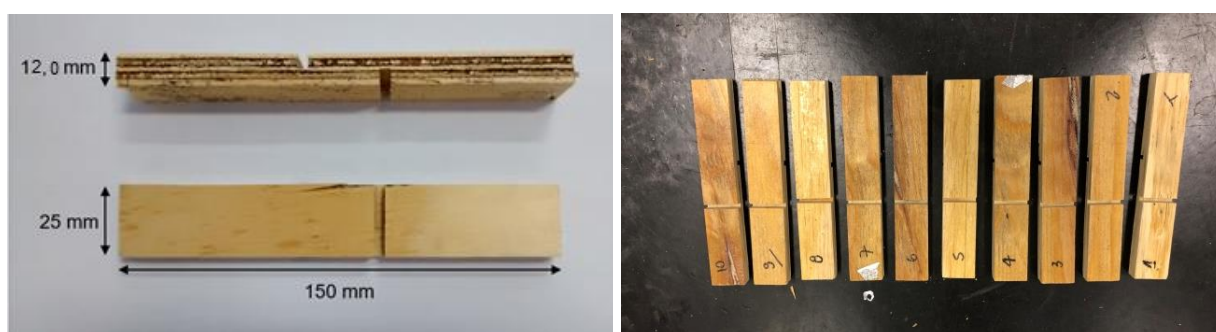
e – espessura do corpo de prova, em mm.

Houve apenas um ciclo de carga na realização do ensaio e a velocidade de carregamento foi de $0,08 \text{ mm.s}^{-1}$, calculada através da recomendação da norma. A velocidade então foi inserida no software da EMIC, a qual determinou o módulo de elasticidade em MPa, e a tensão de ruptura à flexão estática de cada corpo de prova ensaiado.

4.5.2 Cisalhamento da linha de cola

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola a norma utilizada foi a ABNT NBR ISO 12466-1:2012. As dimensões dos corpos de prova foram de $150 \times 25 \times 12,0 \text{ mm}$ (Figura 30), os dois sulcos presentes nos mesmos foram feitos 25 mm distantes um do outro. Para este método 10 corpos de prova foram usados.

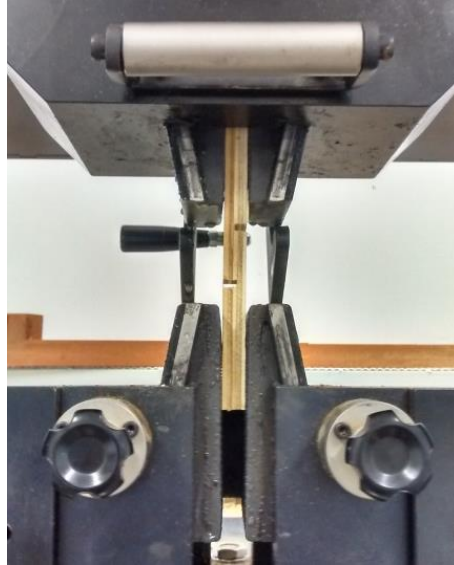
Figura 30 - Corpos de prova para cisalhamento na linha de cola.



Fonte: Autoria própria.

Com um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm foram medidas a distância entre os sulcos, a largura e o comprimento do corpo de prova. Os ensaios para o cisalhamento, então, foram feitos na EMIC (máquina universal de ensaios) no Laboratório de Propriedades dos Materiais situado na UNESP/Campus de Itapeva (Figura 31). A velocidade de carregamento utilizada foi de 120 N.s^{-1} , obtendo um tempo de cerca de 35 segundos para cada corpo de prova, o que está enquadrado na norma.

Figura 31 - Ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: Autoria própria.

A força de cisalhamento foi determinada com o uso da EMIC e calculou-se a tensão de cisalhamento através da Expressão (9):

$$\sigma_{cis} = \frac{F_{rup}}{A} \quad (9)$$

Onde:

σ_{cis} – tensão de cisalhamento, em MPa;

F_{rup} – força de ruptura do corpo de prova, em N;

A – área de cisalhamento, em mm².

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi realizado teste de hipótese através da utilização da Análise de Variância, com nível de significância de 5%, para verificar a existência de diferenças significativas entre as médias. Nos casos em que houve diferenças significativas foi aplicado o Teste de Tukey, com nível de significância de 5%. Para a análise estatística foi utilizado o programa de computador R versão 3.4.2 (2016). As variáveis analisadas foram as diferentes temperaturas e as formas de tratamento e, como resposta, a sua interação com a resina poliuretana.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentados os resultados obtidos nas análises química e superficial das lâminas e, também, nos testes de caracterização físico-mecânica dos painéis segundo documentos normativos nacionais e internacionais.

5.1 ANÁLISE QUÍMICA E SUPERFICIAL DA LÂMINA

5.1.1 Teor de extrativos

A Tabela 1 apresenta a média da análise química para a determinação do teor de extrativos para as duas formas de tratamento térmico nas lâminas para as 3 diferentes temperaturas além da amostra controle. O teor de extrativos varia muito entre as espécies, lotes diferentes de árvores, regiões de cultivo e genética das mudas, sendo normal encontrar para o *Pinus taeda* valores entre 3 e 7% da massa total da madeira seca.

Tabela 1 - Valores médios dos parâmetros de rugosidade superficial em função do tipo de tratamento térmico e temperatura.

Temperatura (° C)	Teor de extrativos totais (%)	
	Estufa	Prensa
Controle (0)	6,61 ^(0,11) Aa	6,56 ^(0,10) Aa
160	6,97 ^(0,10) Ab	8,52 ^(0,40) Bb
180	5,50 ^(0,05) Ac	7,65 ^(0,12) Bc
200	6,56 ^(0,10) Aa	7,68 ^(0,09) Bc

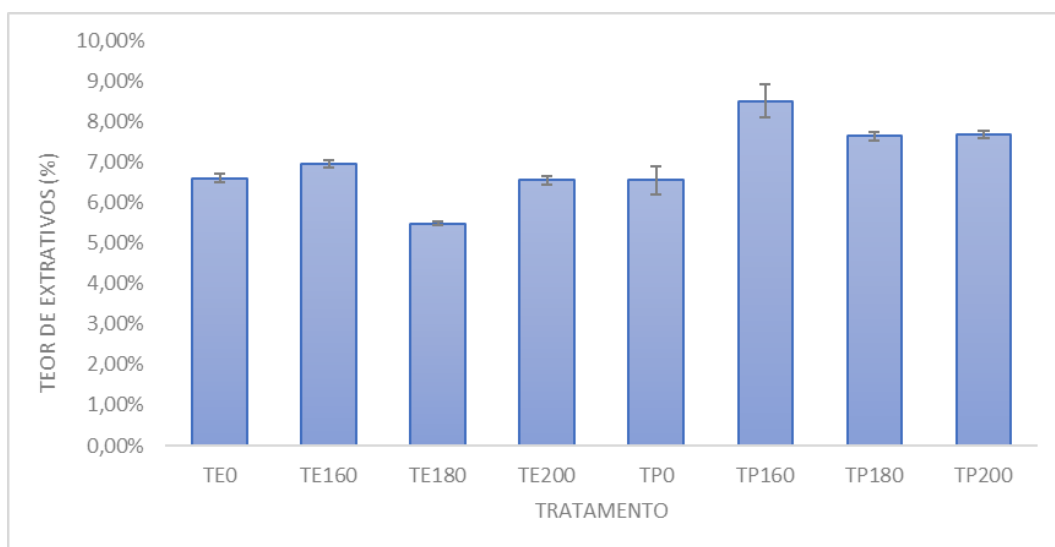
* Médias seguidas de mesma letra - maiúscula na linha e minúscula na coluna - não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados indicaram que as lâminas submetidas a tratamento térmico em prensa apresentaram maiores teores de extrativos comparado ao método estufa. Quando comparado ao grupo controle, verifica-se o acréscimo de 29,8%, 16,6% e 17,1% dos extrativos para as temperaturas de tratamento 160 °C, 180 °C e 200 °C, respectivamente (Figura 32).

O aumento no teor de extrativos pode ser explicado pela formação de subprodutos causada pela degradação das hemiceluloses, enquanto a redução é associada à sua volatilização durante o tratamento e à polimerização desses subprodutos com outros polímeros da parede celular, fixando-se na madeira (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003; KAMDEM et al., 2002).

Figura 32 - Resultados do teor de extrativos em função dos tratamentos.



Fonte: Autoria própria.

Os acréscimos encontrados no método prensa estão de acordo com o relatado por Esteves et al. (2008) que afirmou que a madeira modificada termicamente possui mais extrativos, mais lignina aparente e menos polissacarídeos do que a original. Também Kaciková et al. (2013) analisando a madeira de *Picea abies* L verificaram o aumento do teor de extrativos com o aumento da temperatura até 270°C.

Silva (2012) ao analisar o comportamento da madeira de *Pinus taeda* submetida a 32,97 horas a taxas de aquecimento lenta verificou o aumento nos teores de extrativos em até seis vezes em comparação à testemunha. Aumento nos teores de extrativos também de *Pinus taeda* foi constatado por Ferreira (2017) ao analisar a termorreificação de lâminas para produção de compensado. As lâminas foram expostas a temperaturas de 160, 180 e 200 °C pelo período de uma hora quando foi possível verificar um aumento de até 33,0% do teor de extrativos em relação as lâminas sem tratamento.

França (2019) ao analisar os efeitos da temperatura nas propriedades da madeira de *Pinus sp.* expostas a alta temperatura pelo período de 1 e 4 horas, verificou, da mesma forma que neste experimento, ao utilizar estufa, a diminuição no valor de extrativos totais para temperaturas até 260°C, sendo a redução maior para tempos mais prolongados de exposição.

Zanuncio et al. (2014) destacaram como causa para diminuição dos teores a volatilização dos extrativos polares durante o tratamento. Os autores ao realizar a termorreificação do *Eucalyptus grandis* a 170, 200 e 230 °C por 3, 5 e 7 h sob pressão atmosférica e na presença de ar observaram menores teores a temperaturas de 170 °C e maiores teores a temperatura de 230

°C. A amostra controle apresentava teores de extrativos próximo a madeira utilizada neste experimento (6,05 %).

Como visto, a degradação térmica dos componentes menos resistentes gerando mais extrativos, concomitantemente com a volatilização dos extrativos juntamente com a água durante o processo de termorretificação, é vista como principal explicação para as alterações nos teores de extrativos totais, que diferem com relação ao método adotado e as variáveis equipamento, tempo e temperatura.

Neste estudo, é possível considerar que no método prensa, em decorrência do contato dos pratos com a superfície, a degradação térmica dos componentes foi favorecida, ocorrendo de forma mais evidente a alteração dos componentes do que sua volatilização.

5.1.2 Rugosidade superficial

A Tabela 2 apresenta as médias dos valores obtidos para determinação da rugosidade superficial das lâminas de madeira em função do tipo de tratamento e temperaturas adotadas. Valores de rugosidade entre 40–60 μm são encontrados na indústria para lâminas sem acabamento (THOEMEN; IRLE; SERNEK, 2010).

Tabela 2 - Valores médios de rugosidade superficial em função do tratamento térmico aplicado.

Temperatura (° C)	Valores médios de R_a (μm)	
	Estufa	Prensa
Controle (0)	45,03 ^(12,85) Aa	22,08 ^(1,81) Ba
160	39,50 ^(2,25) Aa	13,12 ^(1,55) Bb
180	20,65 ^(5,68) Ab	16,80 ^(5,18) Ab
200	19,05 ^(5,84) Ab	15,48 ^(4,55) Ab

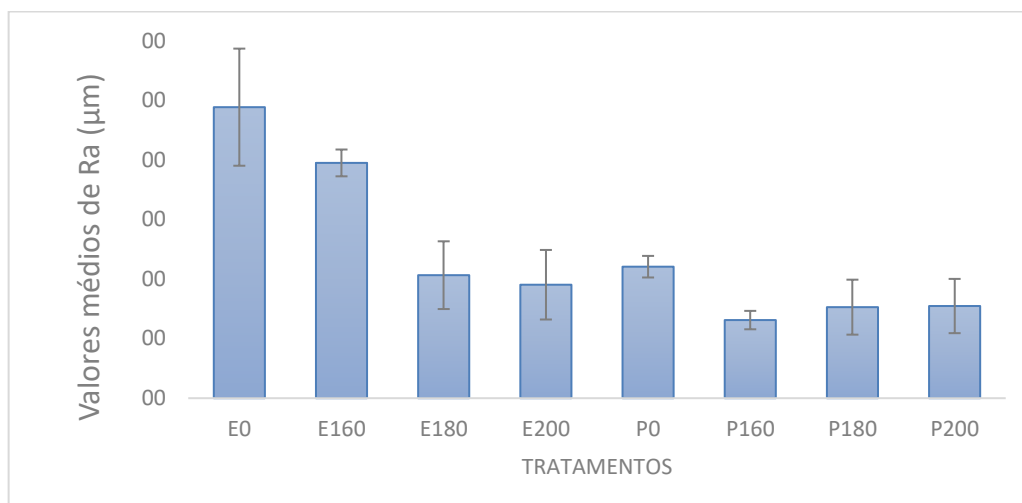
* Médias seguidas de mesma letra - maiúscula na linha e minúscula na coluna - não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

Fonte: Autoria própria.

Apesar da lâmina tratada em prensa apresentar-se abaixo do padrão industrial relatado por Thoemen, Irle e Sernek (2010), os resultados obtidos neste estudo indicaram a melhora da qualidade de acabamento superficial da madeira com o tratamento, isto é, diminuição da rugosidade, o que era esperado (Figura 33).

Ferreira (2017) utilizando um microscópio eletrônico de varredura com um aumento de 100 vezes percebeu que o tratamento de termorretificação das lâminas de *Pinus taeda* deixou a superfície menos rugosa em virtude da degradação das fibras da superfície.

Figura 33 - Valores médios para os tratamentos para a rugosidade.



Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma, Salca e Hiziroglu (2014) mostraram em seus estudos com quatro diferentes espécies de madeira que a termorretificação diminuiu a rugosidade e, conseqüentemente, tornou a superfície mais lisa. Unsal e Ayrilmis (2005), Kamdem, Pizzi e Jermannaud (2002) e Gündüz, Korkut e Korkut (2008) também notaram diminuição na rugosidade superficial com o aumento da temperatura ao analisarem madeiras de diferentes espécies.

O tratamento térmico, em suma, melhorou a qualidade de superfície das lâminas, implicando em melhor qualidade do produto acabado. Todavia, para Ferreira (2017), isso é uma desvantagem, pois uma superfície menos rugosa apresenta menor área de contato, diminuindo o número de “ganchos” na colagem, piorando a qualidade adesiva do produto.

5.1.3 Ângulo de contato superficial

A Tabela 3 apresenta as médias de ângulos de contato das mesmas amostras analisadas no item 5.1.2. Observou-se que quanto maior foi a temperatura para o tratamento em estufa, maior foi o ângulo de contato, exceção no tratamento em prensa a 180 °C que teve um ângulo de contato maior que a 200 °C.

Apesar da atipicidade ocorrida para o tratamento em prensa a 180 °C, os resultados indicaram que o tratamento térmico reduziu a molhabilidade da madeira em água, o que já era esperado, já que um dos objetivos do tratamento é a redução da higroscopicidade. Nas fotos obtidas a partir do goniômetro (Figura 34), é possível observar o menor espalhamento e fluidez da gota sobre a superfície tratada termicamente, evidenciando que a termorretificação tornou a superfície mais hidrofóbica.

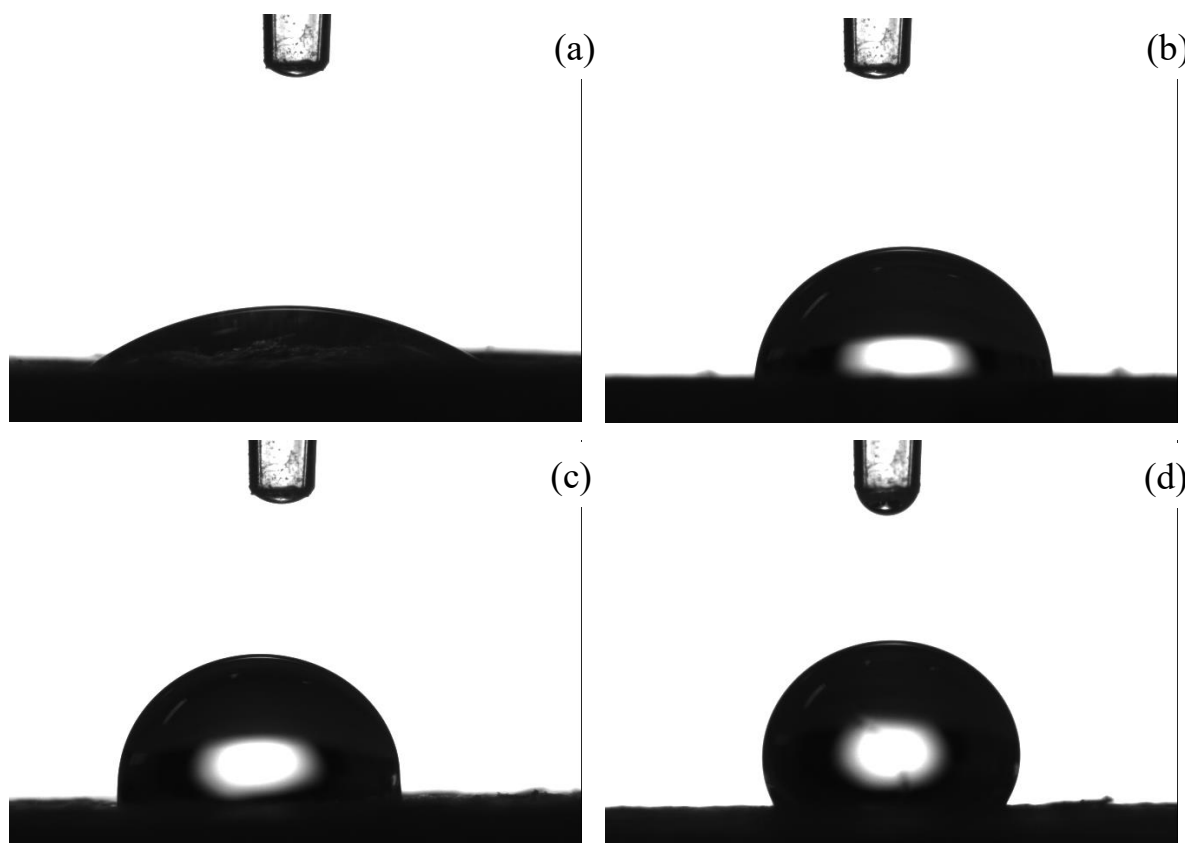
Tabela 3 - Valores médios de ângulo de contato em função do tratamento térmico aplicado.

Temperatura (° C)	Valores médios de ângulo de contato (°)	
	Estufa	Prensa
Controle (0)	52,27 ^(9,33) Aa	37,63 ^(5,27) Ba
160	88,38 ^(1,99) Ab	59,20 ^(7,89) Bb
180	91,05 ^(1,12) Ac	77,01 ^(8,40) Bc
200	96,07 ^(5,53) Ad	74,61 ^(1,24) Bc

* Médias seguidas de mesma letra - maiúscula na linha e minúscula na coluna - não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

Fonte: Autoria própria.

Figura 34 - Imagens das gotas depositadas sobre a superfície da lâmina de madeira não tratada (a) e termorretificadas a 160 °C (b), 180 °C (c) e 200 °C (d).



Fonte: Autoria própria.

Nas imagens mostradas acima pode-se observar que a amostra não tratada (Figura 34a) apresentou um estado de grande afinidade pela água, com ângulo de contato inferior à 90°, predominando o regime de molhamento parcial de superfície. Para as amostras tratadas à 160°C, 180 °C e 200 °C observa-se que os valores de ângulo de contato se mostraram próximos (Figura 34b e 34c) ou superior à 90° (Figura 34d) passando a apresentar características mais hidrofóbicas.

Esse fenômeno foi observado também por Ferreira (2018) ao termorretificar lâminas de *Pinus taeda* para produção de compensado pelo período de uma hora, mostrando que a penetração e a fluidez da gota sobre a superfície sem tratamento foram maiores. Os valores médios encontrados para o ângulo de gota em seus estudos foram próximos ao obtido neste experimento, sendo 39,88° para a lâmina sem tratamento e 73,48°, 93,83° e 96,08°, respectivamente, para as temperaturas de 160 °C, 180 °C e 200 °C.

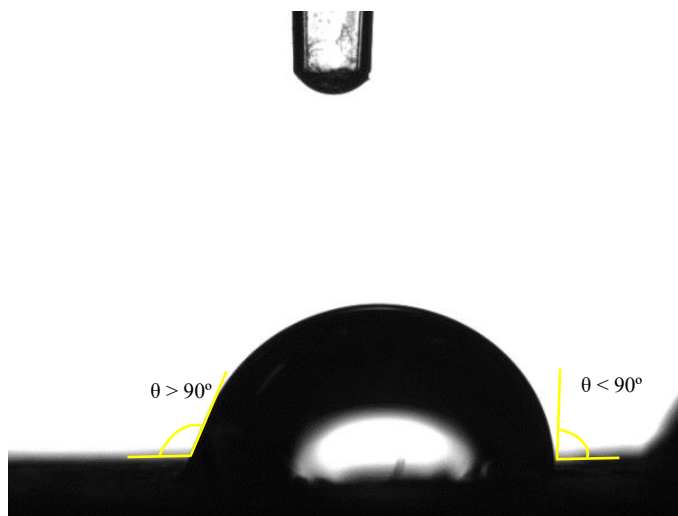
Sernek et al. (2004) Follrich et al. (2006) Kariz e Sernek, (2010) Santos (2015), da mesma forma, ao analisarem o ângulo de contato da água em superfícies de madeiras tratadas termicamente com outras espécies verificaram que as superfícies das madeiras tratadas se tornaram menos hidrofílicas e significativamente repelente à água.

Essa redução na molhabilidade da superfície da madeira termorretificada ocorre devido a um conjunto de fatores, dentre os quais se destacam a redução do número de hidroxilas, ou seja, redução no número de sítios de sorção primária (grupos OH) dentro da parede celular da madeira, principalmente devido a remoção e degradação das hemiceluloses; aumento da cristalinidade da celulose (PÉTRISSANS et al., 2003); plastificação da lignina, que pode causar uma reorganização no arranjo dos polímeros lignocelulósicos da madeira (HAKKOU et al., 2005) ou ainda à migração de extrativos para a superfície da madeira, formando a chamada superfície inativa ou contaminada, que bloqueiam os sítios de reação (PODGORSKI et al., 2000).

Já o resultado divergente encontrado a 180 °C para o tratamento em prensa pode ser explicado pela heterogeneidade encontrada na superfície. Como as lâminas utilizadas neste experimento não sofreram qualquer intervenção em sua superfície (lixamento), as medidas locais do ângulo de contato foram sobremaneira afetadas pela rugosidade, o que levou a formação de um ângulo de contato maior e não condizente com a condição de equilíbrio geral (Figura 35). Esta anomalia observada do molhamento é dado o nome de histerese (DECKER; GAROFF, 1997; LONG et al., 2005; SOBCZAK; SINGH; ASTHANA, 2006; EUSTATHOPOULOS et al., 2006).

Mesmo com os efeitos de histerese observados, conclui-se que as lâminas de características hidrofílicas tiveram sua superfície modificada após submetidas ao tratamento com temperatura, se tornando mais hidrofóbicas, independentemente do método adotado. Para Santos (2015), madeiras com menor molhabilidade são menos propensas ao ataque de fungo, pois como a madeira absorve menos água do ar (umidade), as condições para o desenvolvimento de microorganismos se tornam menos favoráveis.

Figura 35 – Histerese do ângulo de contato devido a rugosidade da superfície. Diferenças no ângulo de contato foram observadas devido a não homogeneidade topográfica da superfície.



Fonte: Autoria própria.

5.2 ENSAIOS FÍSICOS

5.2.1 Massa específica aparente

Para ABIMCI (2007), o valor mínimo da massa específica aparente em painéis estruturais de 5 lâminas de *Pinus* confeccionados com resina fenol formaldeído é de $0,476 \text{ g.cm}^{-3}$ e o valor máximo de $0,641 \text{ g.cm}^{-3}$ existindo um valor médio de $0,552 \text{ g.cm}^{-3}$.

A Tabela 4 apresenta os valores médios e os respectivos desvios padrões para os painéis produzidos neste experimento, onde se observa que para todos os tipos de tratamentos os valores de massa específica aparente médios encontraram-se dentro do intervalo especificado.

Tabela 4 - Valores médios de massa específica aparente base seca acompanhados dos desvios padrões.

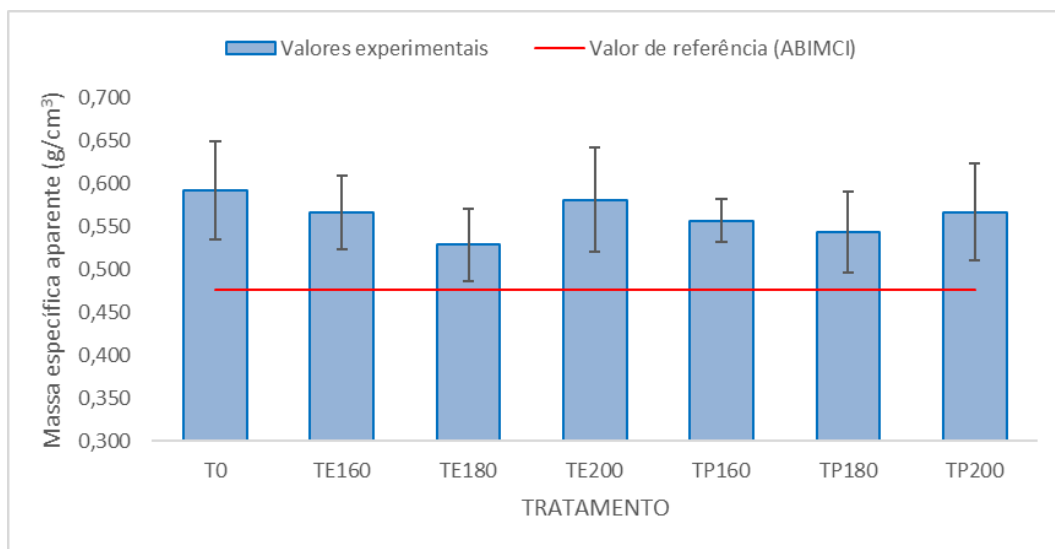
Temperatura (° C)	Massa específica aparente (g.cm^{-3})	
	Estufa	Prensa
Controle (0)	0,592 ^(0,057) Aa	0,592 ^(0,057) Aa
160	0,566 ^(0,043) Aab	0,557 ^(0,025) Aa
180	0,528 ^(0,042) Ab	0,543 ^(0,047) Aa
200	0,581 ^(0,061) Aab	0,567 ^(0,057) Aa

* Médias seguidas de mesma letra - maiúscula na linha e minúscula na coluna - não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostraram que não houve diferença significativa entre as formas de tratamento. Em relação a variação da temperatura, houve uma ligeira redução da massa específica dos painéis tratados termicamente, de maneira geral, não estatisticamente significativa. Apenas o painel produzido com lâminas termorretificadas em estufa a 180 °C apresentou diferença significativa em relação a testemunha, com diferenças numéricas pequenas (Figura 36).

Figura 36 – Valores médios para os tratamentos para a massa específica aparente base seca.



Fonte: Autoria própria.

Reduções na densidade após a termorretificação é normal ocorrer segundo Calonego (2009). Ao analisar madeira bruta de *Eucalyptus grandis* tratadas termicamente a temperaturas de 140, 160 e 180 °C o autor encontrou reduções na ordem de 7,5%, sendo as reduções mais bruscas ocorridas também a temperatura de 180 °C.

Segundo a literatura, as reduções observadas estão associadas principalmente à degradação das hemiceluloses que degradam em baixas temperaturas, entre 160 e 220 °C (PONCKSAC et al., 2006). Os demais constituintes não sofrem influência nesta faixa de temperatura. A degradação da celulose começa ao redor de 220 °C (BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006) e a lignina passa a sofrer alterações acima de 250 °C (WINDIEISEN; WEGENER, 2008).

Ferreira (2017) estudando o efeito do tratamento térmico em painéis compensados produzidos com *Pinus taeda* termorretificados a 160 °C, 180 °C e 200 °C e resina fenol-formaldéido observou que a perda de massa, mesmo presente, não foi elevada, sendo a redução mais brusca na ordem de 2,15% para a temperatura de 200 °C, de forma que não houve influência significativa do tratamento na densidade básica para nenhuma das temperaturas estudadas.

Silva (2012) em seu trabalho relata que os valores de massa específica não podem ser associados exclusivamente a perda de massa durante o processo de termorretificação, devendo também ser considerado a variabilidade natural da madeira que pode se sobrepor aos efeitos do tratamento térmico. Em seus estudos ele analisou o *Pinus taeda in natura* tratadas em estufa a temperaturas entre 160° e 260°.

O aumento da massa específica da madeira, em alguns casos, também é observado, sendo explicado por Batista et al. (2011) e Lengowski (2011) como decorrente da retração da madeira não ser proporcional a sua perda de massa durante o tratamento, resultando na redução do volume.

Dos resultados, verifica-se que a análise do efeito da termorretificação na massa específica pode levar a conclusões conflitantes a depender da combinação de vários fatores. Neste estudo, a massa específica aparente não foi fator decisivo e limitante na escolha do melhor tratamento.

5.2.2 Teor de umidade

Os resultados do teor de umidade final dos painéis produzidos são apresentados na Tabela 5 para cada faixa de temperatura. Para ABIMCI (2007), o valor mínimo para painéis de caráter estrutural produzidos com 5 lâminas e com resina fenol formaldeído é de 9%, enquanto, que o valor máximo é de 12% existindo um valor médio de 10%.

Tabela 5 - Valores médios do teor de umidade acompanhados dos desvios padrões.

Temperatura (° C)	Teor de Umidade (%)	
	Estufa	Prensa
Controle (0)	7,37 ^(0,99) Aa	7,37 ^(0,99) Aa
160	6,95 ^(0,56) Aab	6,99 ^(0,78) Aa
180	6,34 ^(0,42) Ab	6,42 ^(1,33) Aab
200	6,11 ^(0,41) Ab	5,78 ^(1,08) Ab

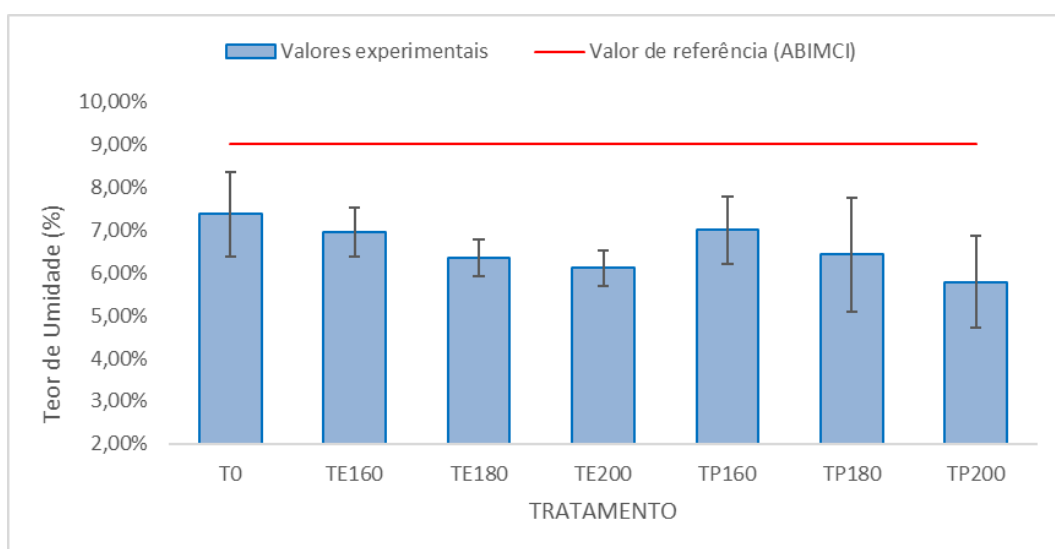
* Médias seguidas de mesma letra - maiúscula na linha e minúscula na coluna - não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

Fonte: Autoria própria.

Os valores obtidos neste estudo foram abaixo do valor mínimo classificatório para os painéis produzidos com fenol-formaldeído. Thoemen, Irle e Sernek (2010) explicam que materiais à base de madeira colados com resina fenólica possuem um forte comportamento higroscópico o que leva a teores de umidade de equilíbrio mais altos.

Não houve diferença significativa entre as formas de tratamento e tanto o tratamento em prensa como em estufa obtiveram diminuição do teor de umidade com o aumento da temperatura de termorretificação, como mostrado na Figura 37, o que leva a conclusão que o tratamento das lâminas se mostrou eficiente, uma vez que se obteve painéis menos higroscópicos sem afetar significativamente a densidade dos painéis, conforme reportado no item 5.2.1..

Figura 37 - Valores médios para os tratamentos para o teor de umidade.



Fonte: Autoria própria.

A redução da umidade de equilíbrio também foi observada por Ferreira (2017) na produção dos painéis compensados com lâminas de *Pinus taeda* termorretificadas a 160 °C, 180 °C e 200 °C e resina fenol-formaldéido.

Neste estudo, a redução mais brusca foi observada para os painéis produzidos com lâminas termorretificadas em prensa a 200 °C onde a redução chegou a alcançar 21,5%. Paajanen et al. (2012) ao utilizarem equipamentos de secagem similares verificaram que o contato direto das lâminas com os pratos resulta num método mais eficiente de troca de calor, o que pode justificar os resultados encontrados neste experimento.

Resultados semelhantes a este trabalho foram encontrados por Araújo et al. (2012) ao estudarem as propriedades das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus sp.* termorretificadas em estufa e prensa nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C. Os autores verificaram a redução significativa na umidade de equilíbrio pelos dois métodos de tratamento quando comparada com a testemunha, sendo que a redução do teor de umidade para o *Eucalyptus sp.* também foi maior no método prensa.

A diminuição da umidade de equilíbrio deve-se à menor quantidade de água adsorvida pelo painel em consequência das mudanças químicas ocorridas durante o tratamento como a

diminuição de grupos hidroxila e redução da acessibilidade por aumento da cristalinidade da celulose, bem como pelo aumento das ligações cruzadas na lignina (BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006)

5.2.3 Absorção de água após imersão por 24 horas

A Tabela 6 apresenta os resultados médios para o teste de absorção de água para os tipos de tratamento realizados. O catálogo técnico para painéis compensados de *Pinus* disponibilizado pela ABIMCI (2007) não oferece valores referenciais para essa propriedade, entretanto, as amostras tratadas termicamente apresentaram valores de absorção menores em comparação à testemunha, evidenciando assim a perda de higroscopicidade.

Tabela 6 - Valores médios de absorção de água acompanhados dos desvios padrões.

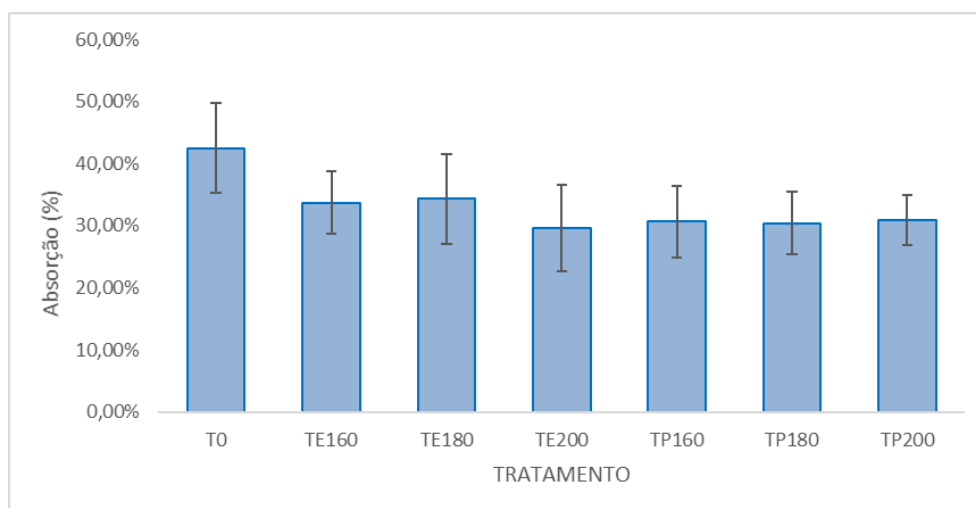
Temperatura (° C)	Absorção (%)	
	Estufa	Prensa
Controle (0)	42,53 ^(7,29) Aa	42,53 ^(7,29) Aa
160	33,71 ^(5,09) Ab	30,67 ^(5,74) Ab
180	34,30 ^(7,29) Ab	30,38 ^(5,05) Ab
200	29,55 ^(6,98) Ab	30,94 ^(4,06) Ab

* Médias seguidas de mesma letra - maiúscula na linha e minúscula na coluna - não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

Fonte: Autoria própria.

A diferença dos valores médios de absorção de água após imersão em água por 24 horas para os dois diferentes métodos de tratamento térmico, variando-se a temperatura, é mostrada na Figura 38, onde se observa a uniformidade entre os tratamentos.

Figura 38 - Valores médios para os tratamentos para a absorção de água.



Fonte: Autoria própria.

Thoemen, Irle e Sernek (2010) relata que painéis à base de madeira são fortemente influenciados por adesivos, densidade e tecnologia de produção (secagem, tratamento da madeira), além da quantidade de extrativos e características da própria superfície. A aplicação de temperatura durante o tratamento foi o parâmetro mais influente ao alterar as características superficiais das lâminas.

A diminuição de absorção de água é explicada pela característica hidrofóbica adquirida pela lâmina a partir do tratamento térmico, que conforme Weiland e Guyonnet (2003) apontou em seus estudos, as hemiceluloses, além de ser o constituinte mais hidrófilo da madeira, é também o mais sensível termicamente, sendo o primeiro componente a ser decomposto, levando ao desaparecimento dos sítios de adsorção de água (principalmente os grupos hidroxilas).

5.2.4 Inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas

O inchamento em espessura está diretamente relacionado a quantidade de água existente no meio em que se insere. Problemas de contração e inchamento podem ser reduzidos minimizando a capacidade da madeira de trocar água com o meio. A Tabela 7 apresenta os valores de inchamento para os painéis tratados em comparação com o painel não tratado. O catálogo técnico para painéis compensados de *Pinus* disponibilizado pela ABIMCI (2007) não oferece valores referenciais para essa propriedade.

Tabela 7 - Valores médios de inchamento em espessura.

Temperatura (° C)	Inchamento (%)	
	Estufa	Prensa
Controle (0)	4,90 ^(0,58) Aa	4,90 ^(0,58) Aa
160	4,26 ^(0,21) Aab	4,68 ^(0,62) Aab
180	3,81 ^(0,22) Aab	4,67 ^(0,48) Bab
200	3,65 ^(0,55) Ab	3,46 ^(0,38) Ab

* Médias seguidas de mesma letra - maiúscula na linha e minúscula na coluna - não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

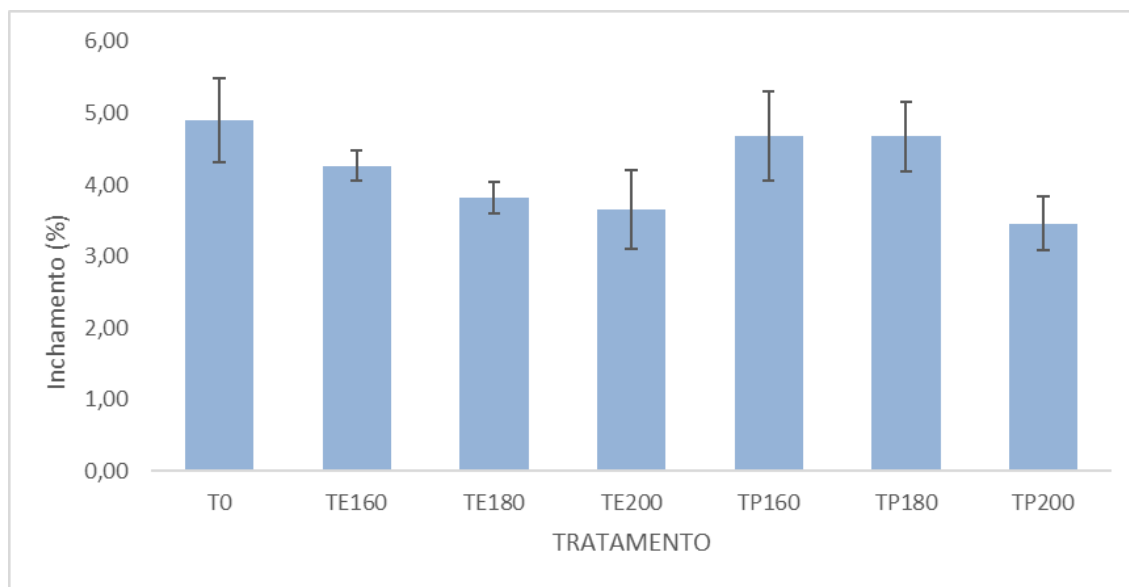
Fonte: Autoria própria.

De modo geral, foi possível observar que houve uma tendência de diminuição do inchamento em espessura com o aumento da temperatura de termorretificação. Essa redução foi significativa para as lâminas tratadas a 200°C, com redução de 25,5% para o tratamento em estufa e 29,4% para o tratamento em prensa em comparação a testemunha. A Figura 39 mostra o comportamento da propriedade de inchamento em espessura dos painéis tratados

termicamente, onde se verifica que a madeira termorretificada possui a tendência de se tornar mais estável.

No estudo realizado por Poubel et al. (2013), a termorretificação melhorou a estabilidade dimensional da madeira, diminuiu a umidade de equilíbrio, o inchamento e as contrações da madeira após o tratamento, o mesmo que ocorreu neste estudo para o inchamento em espessura para painéis compensado.

Figura 39 - Valores médios para os tratamentos para o inchamento em espessura.



Fonte: Autoria própria.

Valores inferiores de inchamento também foram encontrados por Ferreira (2017) ao comparar as propriedades do painel compensado sem tratamento e tratado termicamente nas temperaturas 160 °C, 180 °C e 200 °C por 1 h em estufa. O autor encontrou valor médio para testemunha de 8,68%, enquanto para os painéis tratados os valores de 8,50%, 8,31% e 7,42%. Os maiores valores encontrados em seus estudos podem ser explicados pelo uso da resina fenol-formaldeído que possui um forte comportamento higroscópico.

O comportamento da variação volumétrica da espécie *Pinus taeda* tratada termicamente também foi avaliada por Silva (2012). Nas condições experimentais estudadas, o tratamento térmico influenciou de modo significativo esta propriedade. As reduções médias na higroscopicidade ao longo do tratamento foram aproximadamente de: 27% a 160 °C, 48% a 180 °C, 43% a 200 °C. Reduções na ordem de 63,9% e 77,3% foram encontrados por Aro, Brashaw e Donahue (2014) ao termorretificar painéis comerciais colados com resina fenol-formaldeído a temperaturas de 140 e 180 °C.

Diversos estudos relacionaram a higroscopicidade com o tratamento térmico, dentre esses estudos pode-se citar Brito et. al (2006), Esteves; Graça e Pereira (2008), Kartal; Hwang e

Imamura (2007) e Reppellin e Guyonmet (2005), de forma que quanto maior a temperatura de tratamento térmico, menor é a sua capacidade de absorção de água e, conseqüentemente, menor sua variação dimensional.

A menor variação na estabilidade dimensional da peça permite a obtenção de um produto com maior qualidade e valor agregado (BORGES; QUIRINO, 2004).

5.3 ENSAIOS MECÂNICOS

5.3.1 Flexão estática paralela às fibras

De acordo com a ABIMCI (2007), o valor médio para o módulo de ruptura (MOR) paralelo de chapas de compensados estruturais produzidas com 5 lâminas e com resina fenólica é de 45,36 MPa, tolerando como valor mínimo 27,38 MPa e como valor máximo 63,58 MPa. Para o módulo de elasticidade (MOE) o valor médio é de 5139,78 MPa, tolerando como valor mínimo 3100,72 MPa e como valor máximo 7063,29 MPa.

Os valores médios do MOR e do MOE paralelos obtidos experimentalmente para painéis produzidos com 5 lâminas e termorretificadas em estufa e prensa, com uso de resina poliuretana à base de mamona estão apresentados na Tabela 8. Todos os grupos tratados atenderam as especificações mínimas exigidas para o MOE e MOR em referido catálogo, embora os resultados mostrarem-se bastante heterogêneos, mostrando sua variabilidade em relação a essa propriedade.

Tabela 8 - Valores médios acompanhados dos respectivos desvios padrões para direção paralela às fibras.

Temperatura (° C)	MOR (MPa)		(MOE) MPa	
	Estufa	Prensa	Estufa	Prensa
Controle (0)	49,74 ^(6,00) Aa	49,74 ^(6,00) Aa	6725,22 ^(1632,33) Aa	6725,22 ^(1632,33) Aa
160	37,21 ^(1,56) Aa	53,12 ^(1,57) Ba	4888,08 ^(674,71) Ab	5636,96 ^(1880,02) Aa
180	40,25 ^(4,13) Aa	45,89 ^(5,25) Aa	5188,83 ^(1385,19) Aab	6341,37 ^(1178,28) Aa
200	52,04 ^(5,27) Aa	37,59 ^(4,21) Ba	6774,60 ^(1103,82) Aa	5896,64 ^(1147,37) Aa

* Médias seguidas de mesma letra - maiúscula na linha e minúscula na coluna - não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

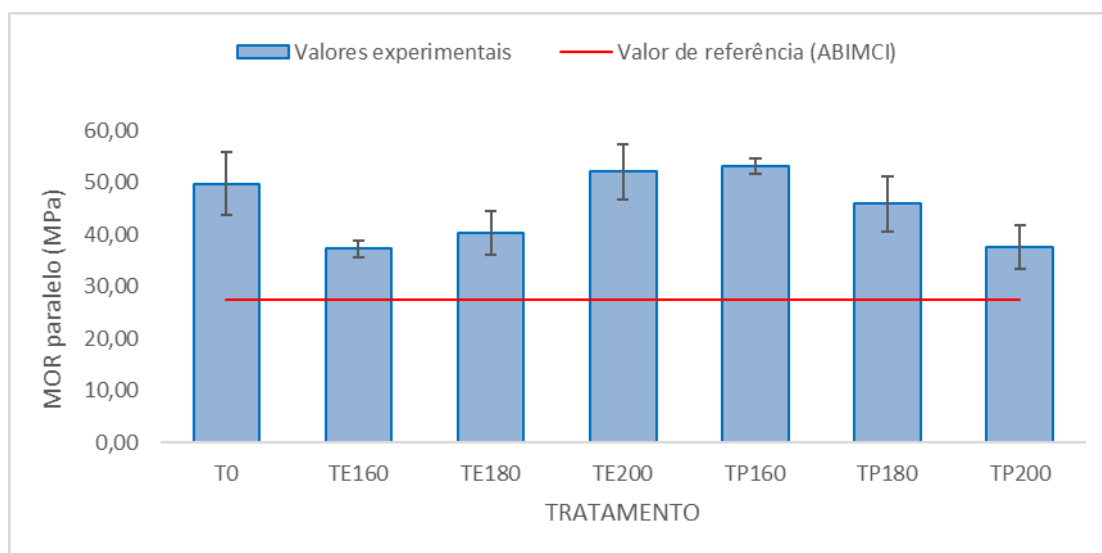
Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos mostraram que os melhores valores do MOR ficaram para o tratamento em estufa a 200 °C e prensa a 160 °C que superaram o módulo de ruptura do painel testemunha em 4,6% e 6,8%, respectivamente. Os piores desempenhos ficaram para o

tratamento em estufa a 160 °C e prensa a 200 °C que experimentaram uma redução em torno 25%.

A Figura 40 mostra que com aumento da temperatura houve o acréscimo do MOR para os grupos tratados em estufa, enquanto para os grupos tratados em prensa houve o decréscimo. Logo, os grupos tratados a 180 °C apresentaram resultados mais estáveis.

Figura 40 - Resultados e valor mínimo de referência para o MOR paralelo às fibras dos painéis.



Fonte: Autoria própria.

A qualidade das lâminas utilizadas é um fator a ser considerado nos resultados, pois embora realizada a classificação visual, alguns defeitos podem ter interferido de modo mais efetivo no desempenho físico-mecânico em alguns tratamentos. Liu et al. (2018) estudando painel compensado produzido com *Tsuga heterophylla* verificaram uma forte influência da densidade das lâminas nas propriedades mecânicas dos painéis tratados termicamente o que pode justificar os resultados encontrados neste estudo.

Os resultados encontrados para o MOR no tratamento em prensa estão de acordo com a literatura no sentido de quanto maior foi o tempo e temperatura de tratamento, maior foi a degradação da madeira. Resultados estes também obtidos por Silva (2012) que analisou as propriedades mecânicas da madeira de *Pinus taeda* a temperaturas de 160 a 260 °C e concluiu que com o aumento da temperatura há perdas cada vez maiores para o MOR. O autor analisou a madeira *in natura* tratadas em estufa em taxas de aquecimento lenta.

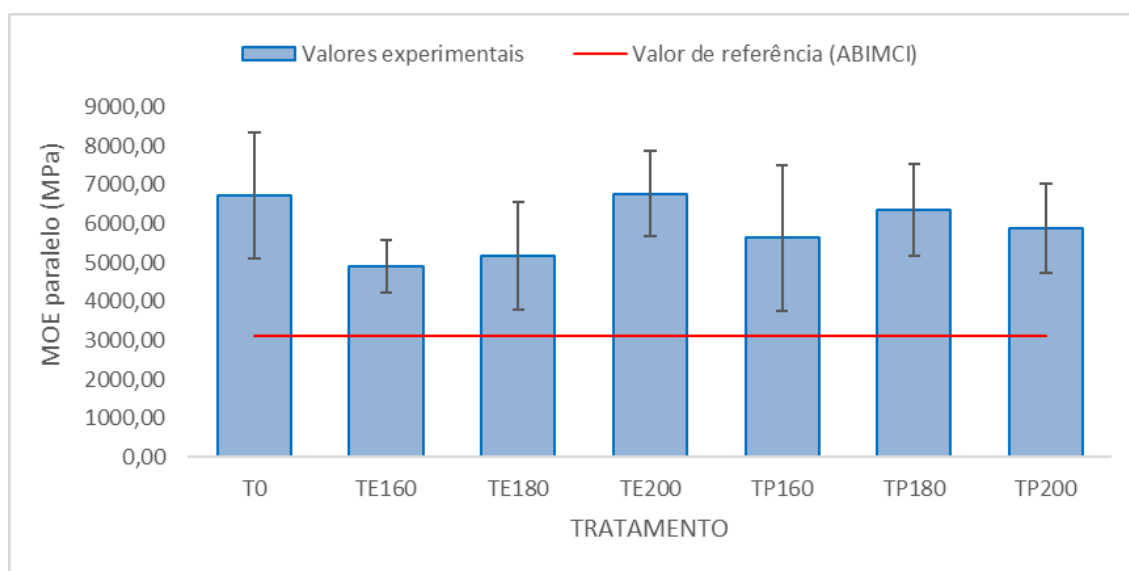
Em tratamento térmico empregando condições próximas a utilizada na presente pesquisa e matéria-prima similar, Ferreira (2017) observou um decréscimo do MOR aos painéis compensados de *Pinus taeda* tratados, concluindo que os tratamentos influenciaram de forma

negativa esta propriedade, principalmente para temperaturas mais altas, utilizando na produção dos painéis um número maior de lâminas e tempo mais longo de exposição ao calor.

Korkut e Hiziroglu (2009) ao analisarem as propriedades mecânicas da madeira Hazelnut (*Corylus coluna L.*) tratada termicamente concluíram que esta propriedade reduz não só com o aumento da temperatura, mas também com o tempo de tratamento, de forma que os resultados mostrados neste experimento sinalizam que o tempo de exposição adotado não foi suficiente para ocasionar alterações drásticas desta propriedade.

Nenhuma tendência de redução da rigidez com o aumento da temperatura foi observada para o MOE, cujos resultados foram representados na Figura 41. Neste gráfico é possível observar que os piores desempenhos foram dos painéis produzidos com lâminas termorretificadas em estufa a 160 e 180 °C.

Figura 41 - Resultados e valor mínimo de referência para o MOE paralelo às fibras dos painéis.



Fonte: Autoria própria.

A semelhança estatística nos dados mostra que a temperatura usada no tratamento não teve influência no MOE na direção paralela às fibras, ao contrário do relatado por Ferreira (2017) que concluiu que tanto o MOR quanto o MOE do painel compensado sofrem tendência de redução após a termorretificação. Da mesma forma, o tempo de tratamento adotado é visto como principal causa para a divergência encontradas nos resultados.

Já para Silva (2012) o tratamento térmico do *Pinus taeda* não proporcina redução do MOE ao trabalhar no intervalo de temperatura entre 160 e 240 °C. Em seus estudos as amostras tratadas a 180 e 200 °C tiveram resultados inclusive superiores ao grupo testemunha. O autor

associou as diferenças no resultado a questões anatômicas da madeira e sua variabilidade dentro do lote e da própria árvore.

Kačíková et al. (2013) associaram a diminuição do MOE e do MOR principalmente a degradação das hemiceluloses que aumenta em temperatura de termorretificação mais alta. Da mesma forma, Korkut e Hiziroglu (2009) analisaram as propriedades mecânicas da madeira Hazelnut (*Corylus coluna L.*) tratada termicamente e concluíram que o MOR e o MOE reduziram não só com o aumento da temperatura, mas também com o tempo de tratamento.

Assim, têm-se que os efeitos da termorretificação para a determinação da resistência e rigidez, ou seja, MOR e MOE, não são unânimes e dependem do material analisado e do processo de termorretificação adotado, em particular do tempo e temperatura. No presente estudo, a exposição da lâmina ao calor pelo período de 30 minutos não apontou ser o parâmetro mais influente.

5.3.2 Flexão estática perpendicular às fibras

De acordo com a ABIMCI (2007) para painéis estruturais de *Pinus* com 5 lâminas e uma espessura de 12 mm, o valor mínimo do MOR perpendicular será de 20,58 MPa e o máximo será de 45,27 MPa existindo um valor médio de 32,05 MPa. De mesma forma, para a ABIMCI 2007 o valor mínimo do MOE perpendicular será de 1762,90 MPa e o máximo será de 4047,22 MPa sendo o valor médio de 2590,96 MPa.

A Tabela 9 apresenta a média e os respectivos desvios padrões para painéis produzidos com 5 lâminas termorretificadas e com resina poliuretano à base de mamona em diferentes temperaturas. Os diferentes tipos de tratamento não apresentaram diferenças estatísticas nos valores médios de MOR e MOE no sentido perpendicular às fibras.

Tabela 9 - Valores médios acompanhados dos respectivos desvios padrões para direção perpendicular às fibras.

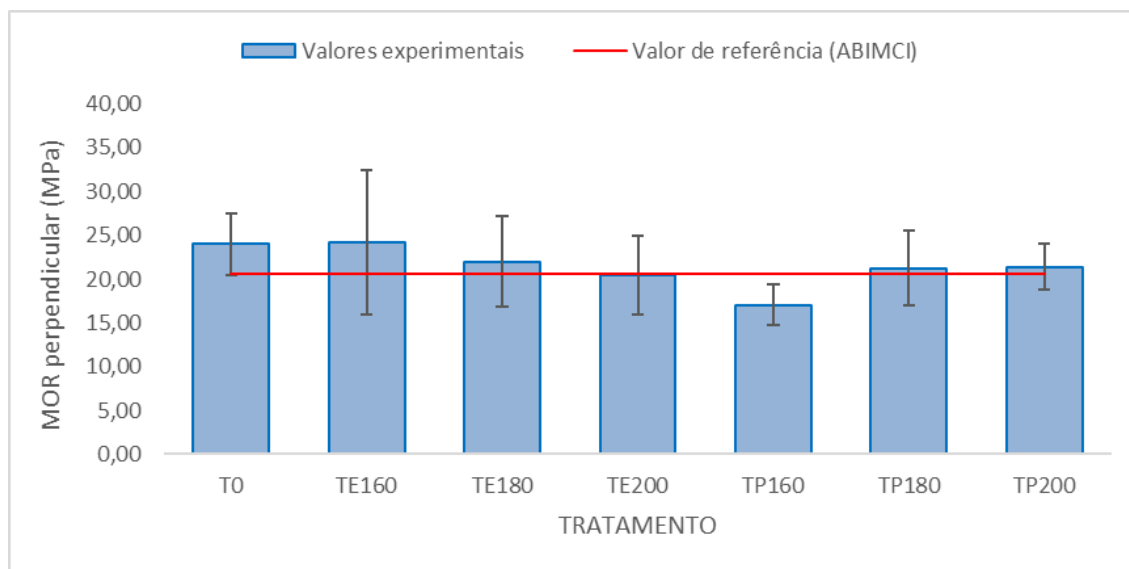
Temperatura (° C)	MOR (MPa)		(MOE) MPa	
	Estufa	Prensa	Estufa	Prensa
Controle (0)	24,04 ^(3,52) Aa	24,04 ^(3,52) Aa	1931,91 ^(139,49) Aa	1931,91 ^(139,49) Aa
160	24,25 ^(8,24) Aa	17,04 ^(2,32) Bb	1872,91 ^(509,90) Aa	1896,57 ^(438,35) Aa
180	22,01 ^(5,11) Aa	21,26 ^(4,31) Bab	2016,19 ^(345,86) Aa	1965,12 ^(380,58) Aa
200	20,51 ^(4,50) Aa	21,41 ^(2,57) Bab	1965,51 ^(531,98) Aa	1726,21 ^(141,00) Aa

* Médias seguidas de mesma letra - maiúscula na linha e minúscula na coluna - não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

Fonte: Autoria própria.

Os painéis ensaiados nesta etapa, com e sem tratamento, apresentaram resultados próximos ao valor mínimo recomendado para o MOR. Nesse interim, os painéis produzidos com lâminas tratadas em estufa a 200 °C e em prensa a 160 °C (Figura 42) não atenderam a especificação do catálogo ABIMCI ao sofrer redução de 14,7% e 29,1%.

Figura 42 - Resultados e valor mínimo de referência para o MOR perpendicular às fibras.



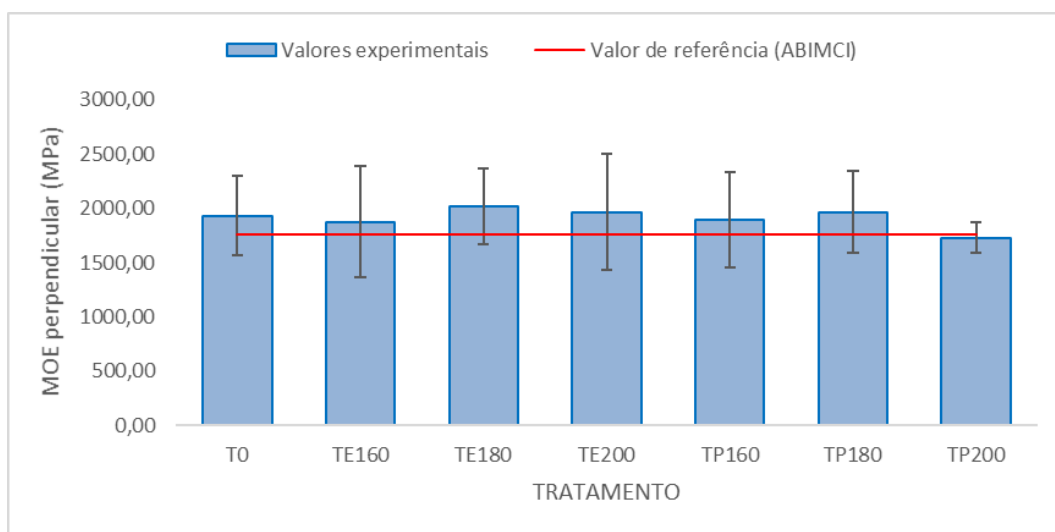
Fonte: Autoria própria.

O painel produzido com lâminas tratadas em prensa a 160 °C foi o único a ter resultados estatisticamente diferente. A menor densidade do painel TP160 pode ter ocasionado o menor valor do MOR, pois para Liu et al. (2018) as propriedades mecânicas dos painéis tratados termicamente sofrem forte influência desta propriedade.

Com relação ao MOE, a Figura 43 mostra que a maior redução foi para os painéis produzidos com lâminas termorretificadas em prensa a 200 °C, único a não atender a especificação do catálogo ABIMCI ao sofrer redução de 10,6%. Os painéis tratados a 180°C tiveram essa propriedade ligeiramente superior a testemunha, com acréscimo não superior a 4,4% para ambas formas de tratamento.

Além da qualidade das lâminas, a redução observada no MOE para o painel produzido com lâminas tratadas em prensa a 200 °C pode estar associada aos efeitos da temperatura seguindo as observações feitas por Ferreira (2017) que observou que quanto maior o aumento da temperatura, maior a redução desta propriedade. O resultado segue ainda as conclusões feitas por Figueroa e Moraes (2009) de que a perda de resistência da madeira à flexão esteja associada ao amolecimento dos polímeros da madeira, principalmente no módulo de elasticidade.

Figura 43 - Resultados e valor mínimo de referência para o MOE perpendicular às fibras.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, observou-se que, assim como no sentido paralelo, também no sentido perpendicular às fibras, o MOR e o MOE sofreram pouca variação, o que permite concluir que os efeitos da temperatura foram pouco significativos no período de 30 minutos.

5.3.3 Cisalhamento na linha de cola

Para ABIMCI (2007) painéis compensados produzidos com 5 lâminas de madeira e com resina fenol-formaldeído, tem valor mínimo da tensão de ruptura na linha de cola de 0,83 MPa e o valor máximo é de 1,71 MPa existindo um valor médio de 1,25 MPa. A Tabela 10 apresenta os valores médios da tensão de ruptura na linha de cola acompanhados dos respectivos desvios padrões para painéis compensados fabricados com resina poliuretana e com 5 lâminas tratadas termicamente.

Tabela 10 - Valores médios acompanhados dos respectivos desvios padrões para tensão de ruptura na linha de cola.

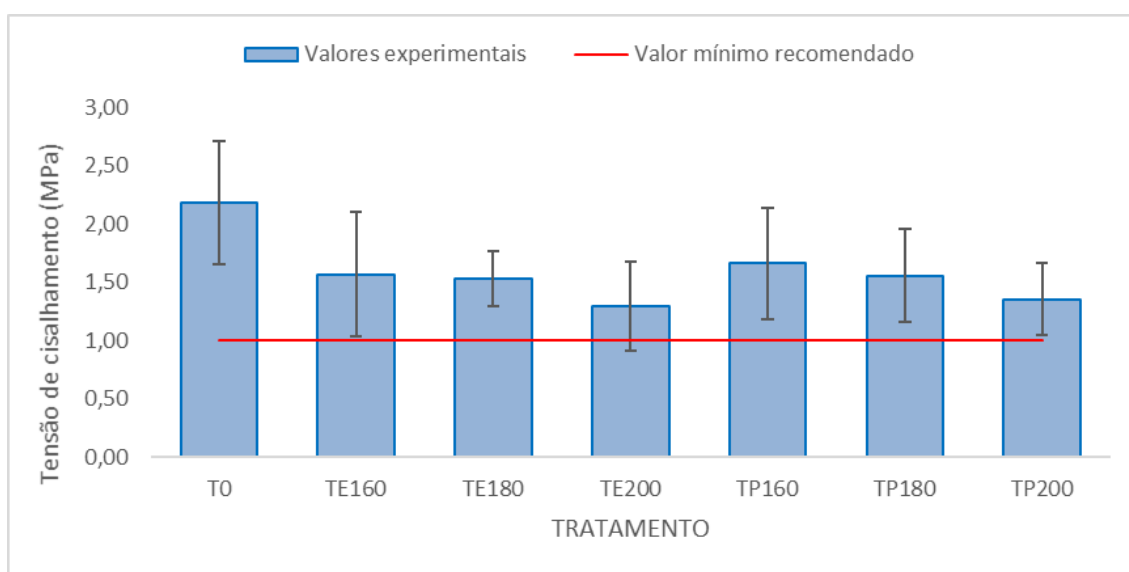
Temperatura (° C)	Tensão (MPa)	
	Estufa	Prensa
Controle (0)	2,19 ^(0,53) Aa	2,19 ^(0,53) Aa
160	1,57 ^(0,53) Aab	1,66 ^(0,48) Aab
180	1,53 ^(0,24) Ab	1,56 ^(0,40) Ab
200	1,29 ^(0,38) Ab	1,35 ^(0,31) Ab

* Médias seguidas de mesma letra - maiúscula na linha e minúscula na coluna - não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Desvio padrão entre parênteses.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados mostraram a redução da tensão de ruptura da linha de cola com o aumento da temperatura (Figura 44). A redução para o método em estufa chegou a 41,1% e para o método prensa a 38,3%. Os painéis produzidos com lâminas tratadas a 160 °C não diferiram estatisticamente do painel testemunha.

Figura 44 - Resultados experimentais e valor mínimo de referência para tensão de ruptura na linha de cola.



Fonte: Autoria própria.

Aro, Brashaw e Donahue (2014) ao termorretificar painéis compensados comerciais, observaram em suas pesquisas a redução de tensão de ruptura de linha de cola em torno de 42,4% e 39,2 % com o incremento da temperatura até 180 °C.

Resultados similares quanto a influência da termorretificação na qualidade de colagem da madeira foram encontrados por Sernek et al. (2008) que estudaram a ligação de produtos não-tratados, e madeira tratada termicamente com diferentes adesivos e concluíram que o tratamento térmico afetou a resistência ao cisalhamento e a delaminação da madeira laminada dependendo do sistema adesivo utilizado para colagem. O pH baixo e a molhabilidade da madeira tratada termicamente foram propostos como sendo as principais razões para esta diferença.

Ferreira et al. (2018) realizaram a termorretificação de painéis compensados em temperaturas que variaram de 160 a 200°C produzidos com lâminas de *Pinus taeda* e adesivo fenol-formaldeído. A partir do teste de molhabilidade os autores concluíram que as superfícies das lâminas se tornaram menos rugosas e mais hidrofóbicas com o aumento da temperatura, e

isso influenciou na diminuição da resistência ao cisalhamento na linha de cola no teste mecânico.

Da mesma forma, a redução da resistência ao cisalhamento na linha de cola após o tratamento térmico, observado neste trabalho, pode ser explicado pela redução dos sítios higroscópicos e da rugosidade da superfície que tornaram mais difícil o ancoramento do adesivo com a madeira. Além disso, a própria redução da capacidade de absorção pode ter impedido o adequado espalhamento do adesivo, afetando a qualidade da adesão.

Ressalta-se, todavia, que as amostras continuaram atendendo os valores propostos pelo catálogo e documentos normativos com os valores de tensão obtidos superiores a 1 MPa não havendo a necessidade de avaliar se a ruptura ocorreu por falha na madeira.

6 CONCLUSÕES

O estudo dos painéis fabricados com lâminas tratadas termicamente e produzidos com resina poliuretana à base mamona se mostrou interessante em vista da compreensão em relação ao seu desempenho físico e mecânico para uso principalmente na construção civil, onde os painéis necessitam de propriedades de resistência para as funções as quais são indicados.

Com os resultados obtidos pôde-se concluir que as lâminas tratadas termicamente apresentaram menor higroscopicidade em comparação às não tratadas. As mudanças ocorridas na superfície das lâminas foram as principais responsáveis pela mudança do padrão do ângulo de contato de gota. Quanto maior a temperatura de termorretificação, menor a rugosidade das lâminas e maiores foram esses ângulos, evidenciando que os tratamentos tornaram a madeira mais hidrofóbica.

Em relação às propriedades físicas do painel acabado, observou-se a redução do teor de umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura no tratamento, o que era esperado, já que o tratamento térmico tornou as lâminas menos higroscópicas.

As propriedades de inchamento em espessura e absorção de água desses painéis também diminuíram com o tratamento, com os melhores resultados advindos do tratamento em prensa associado a melhores mecanismo de transferência de calor do processo.

Não foi observada alteração significativa na massa específica dos painéis tratados. Em geral, a termorretificação reduz a massa específica, no entanto, entende-se que o tempo de 30 minutos pode não ter sido suficiente para proporcionar a degradação completa dos constituintes da madeira, não proporcionando redução significativa.

Em relação às propriedades mecânicas obtidas no teste de flexão no sentido paralelo às fibras da madeira, os resultados obtidos atenderam aos limites especificados pela ABIMCI para painéis de compensado produzidos com lâminas de *pinus* e resina poliuretana tanto para a resistência (MOR) quanto a rigidez (MOE). Os painéis produzidos com lâminas termorretificadas em estufa não seguiram tendência, o que pode ser justificado pelo método de tratamento em estufa apresentar menor interferência na superfície das lâminas, diferente do que ocorre em prensa.

Os resultados para o sentido perpendicular às fibras, também de modo geral, atenderam aos limites propostos pelo mesmo documento da ABIMCI, exceto para o tratamento em prensa a 160°C onde a resistência (MOR) foi inferior. Este não atendimento pode ser justificado pela variabilidade das lâminas utilizadas, que devido a presença de defeitos como nós e desvio de grã podem ter prejudicado o desempenho do painel tendo em vista que todos os grupos, com

ou sem tratamento, apresentaram valores baixos se comparado aos valores fornecidos pelo catálogo ABIMCI.

Com relação a qualidade de colagem dos painéis observou-se que houve redução significativa da tensão de ruptura da linha de cola associada às alterações das propriedades físicas e químicas das lâminas afetadas diretamente pelo tratamento térmico. Os resultados, entretanto, atenderam aos valores mínimos recomendados o que os tornam aceitáveis.

Em suma, pôde-se concluir que a termorretificação das lâminas tornou o painel, além de mais estável dimensionalmente, mais hidrofóbico, o que em termos de durabilidade é bastante positivo para estudos relacionados a resistência dos ataques de organismos xilófagos. O tratamento, entretanto, teve a propensão de causar decréscimo das propriedades mecânicas, mas que pode ser explorada se a resistência mecânica possa ser ligeiramente reduzida para determinada aplicação.

Mediante a estes resultados, observa-se que a melhor temperatura de termorretificação, tanto em termos de propriedades físicas, como mecânicas, foi 180°C. Em termos de tratamento, embora os resultados de modo geral não tenham sido tão diferentes, o tratamento em prensa indicou em alguns testes melhor desempenho.

Como proposta de estudos futuros sugere-se a termorretificação das lâminas em tempos superiores aos 30 minutos utilizados no presente estudo. Sugere-se ainda a realização de testes de envelhecimento acelerado, bioensaios para avaliar a eficiência dos tratamentos térmicos das lâminas e, ainda, a utilização de lâminas de outras espécies de madeira que já vem indicando tendência no mercado de painéis de madeira compensada, como é o caso das lâminas de eucalipto.

REFERÊNCIAS

- ABIMCI. Associação brasileira da indústria de madeira processada mecanicamente. **Catálogo técnico:** painéis de compensados de *Pinus*. Curitiba – PR, 2007. Disponível em: <https://abimci.com.br/>. Acesso em: 12 fev. 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM standards:** adhesives. Washington: ASTM, 1994. 608 p.
- ANSELL, Martin P. (ed.). **Wood composites**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. 436 p.
- ARAÚJO, L. C. R. **Caracterização química e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos**. 1992. 105 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- ARAÚJO, S. O.; VITAL, B. R.; MENDOZA, Z. M. S. H.; VIEIRA, T. S.; CARNEIRO, A. C. O. Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* e SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 327-336, set. 2012. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr95/cap03.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2019.
- ARO, M. D.; BRASHAW, B. K.; DONAHUE, P. K.. Mechanical and physical properties of thermally modified plywood and oriented strand board panels. **Forest Products Journal**, Madison, v. 64, n. 7-8, p.281-289, dez. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287:** rugosidade - método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9484:** compensado: determinação de teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9485:** compensado: determinação de massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9486:** compensado: determinação de absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9531:** compensado: Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9532:** compensado: Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9533:** compensado: determinação de resistência a flexão estática. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9535:** compensado: determinação do inchamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-1:** madeira compensada – qualidade de colagem parte 1: métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-2**: madeira compensada – qualidade de colagem parte 2: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AZAMBUJA, M. A. **Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC)**. 2002. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

AZAMBUJA, R. R. **Aproveitamento de resíduos de construção e demolição para produção de painéis aglomerados**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

AZEVEDO, D. M. P. de; BELTRÃO, N. E. de M. **O agronegócio da mamona no Brasil**. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. 504p.

BALDWIN, R. F. **Plywood and veneer-based products**: Manufacturing Practices. San Francisco: Miller Freeman Inc., 1995.

BARBIRATO, G. H. A.; LOPES JUNIOR, W. E.; HELLMEISTER, V.; PAVESI, M.; FIORELLI, J.. OSB Panels with Balsa Wood Waste and Castor Oil Polyurethane Resin. **Waste And Biomass Valorization**, v. 11, n. 2, p. 743-751, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-018-0474-8>. Acesso: 22 jul. 2019.

BATISTA, D. C. **Modificação térmica da madeira de *Eucayptus grandis* em escala industrial pelo processo brasileiro VAP HolzSystem ®**. 2012. 338 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BENJAMIM, C.A. **Comparação entre três critérios de amostragem para a avaliação da densidade básica da madeira de florestas implantadas de eucaliptos**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, 2002.

BERTOLINI, M. S.; NASCIMENTO, M. F.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.. Painéis de partículas provenientes de rejeitos de Pinus sp. tratado com preservante cca e resina derivada de biomassa. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 339-346, abr. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622014000200014>. Acesso em: 17 abr. 2019.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**: characteristics of wood composites. New York, Van Nostrand Reinhold Company, p. 47, 1982.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **Holz Als Roh- Und Werkstoff**, Berlin, v. 64, n. 3, p. 204-211, 10 jan. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-005-0078-4>. Acesso em: 22 ago. 2019.

BORGES, L.M.; QUIRINO, W.F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado térmicamente. **Revista Biomassa & Energia**, [s.l.], v.1, n.2, p.173-182, 2004. Disponível em: <http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/higroscopicidade.pdf>. Acesso em: 17 maio 2019.

BRANDON, Simon; HAIMOVICH, Nir; YEGER, Einat; MARMUR, Abraham. Partial wetting of chemically patterned surfaces: the effect of drop size. **Journal Of Colloid And**

Interface Science, New York, v. 263, n. 1, p. 237-243, jul. 2003. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9797\(03\)00285-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9797(03)00285-6). Acesso em: 15 set. 2019.

BRASIL. Ministério das cidades - Secretaria Nacional da Habitação Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT) Ministério da Saúde. **Diretriz SINAT N° 005: revisão 02**. Sistemas construtivos estruturados em peças leves de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”). Brasília, DF, mar. 2017. Disponível em: http://pbqp-h.mdr.gov.br/projetos_sinat.php. Acesso em: 01 jun. 2019.

BRITO, J. O.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JR., G.; PESSOA, A. M. C; SILVA, P. H. M. da. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 182-188, abr./jun, 2006. Disponível em: <http://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/download/413/354/>. Acesso em: 11 jul. 2019.

CALIL NETO, C. **Ligações com Parafusos AutoAtarraxantes sem Pré-Furação para uso em Estruturas de Madeira**. 2014. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CALONEGO, F. W. **Efeito da termorretificação nas propriedades físicas, mecânicas e na resistência a fungos deterioradores da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden**. 2009. 149 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2009.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. Estudo Comparativo dos Resultados de Ensaio de Tração Perpendicular para MDF Produzido em Laboratório com Fibras de *Pinus* e de Eucalipto Utilizando Uréia-Formaldeído. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 32-42, 2004.

CAVALHEIRO, R. S. **Madeira Laminada Colada de *Schizolobium amazonicum* Herb. (Paricá): combinação adesivo/tratamento preservante**. 2014. 102p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CHAN.C.M. **Polymer Surface Modification and Charaterization**. New York, Hanser, 1994.

COSTA, M. A.; MENEZZI, C. H. S. del. Effect of thermo-mechanical treatment on properties of parica plywoods (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 1, p.1-8, 29 maio 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882017000100015>. Acesso em: 10 set. 2019.

CRUZ, M. M. S. **Estudo da molhabilidade da madeira de pinho pela resina ureiaformaldeído**. 2006. 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais Lenhocelulósicos) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.

CUNHA, A. B.; RIOS, P. D.; STÜPP, Â. M.; ANTUNES, R.; BRAND, M. A. Produção de painéis compensados com resina fenólica e melamínica sem formaldeído. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 46, n. 4, p. 553 - 560, out. / dez. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v46i4.41628>. Acesso em: 7 mar. 2019.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis**

de madeira compensada e aglomerada. 2005. 151 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DOMINGOS I.; FERREIRA J.; CRUZ-LOPES L.; ESTEVES B. Water-related properties of pinus pinaster wood treated by different methods. **Drewno**, Poznań, v.61, n.202, 2018. Disponível em: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-24fe31aed383-459c-87d3-4c9ad3abcaf2>. Acesso em: 2 fev. 2019.

DUNKY, M. Adhesive in the Wood Industry. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**, 2 ed. New York: Marcel Dekker, 2003. cap. 47, p.887- 956.

DORRER, C.; RUEHE, J. Advancing and receding motion of droplets on ultrahydrophobic post surfaces. **Langmuir**, Washington, v. 22, n. 18, p. 7652-7657, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/la061452d>. Acesso em: 12 maio 2019.

ESTEVES, B.; GRAÇA, J.; PEREIRA, H. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, Wien, v.62, p. 344–351, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1515/hf.2008.057>. Acesso em: 11 jan. 2019.

EUSTATHOPOULOS, N.; SOBCZAK, N.; PASSERONE, A.; NOGI, K.. Measurement of contact angle and work of adhesion at high temperature. **Journal of Materials Science**, London, v. 40, p. 2271-2280, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-005-1945-4>. Acesso em: 10 out. 2019.

FANG H.; WU Q.; HU Y.; WANG Y.; YAN X. Effects of thermal treatment on durability of short bamboo-fibers and its reinforced composites. **Fibers and Polymers**, Seoul, v.14, n.3, p.436–440, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12221-013-0436-5>. Acesso em: 1 nov. 2019.

FERREIRA, B. S. **Avaliação do desempenho de compensados de Pinus taeda submetidos a tratamento térmico e químico.** 2017. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

FERREIRA, B. S.; CAMPOS, C. I.; RANGEL, E. C. Efeito da termorretificação na qualidade de colagem de lâminas de madeira para a produção de compensado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p.274-282, 2 abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509831585>. Acesso em: 17 nov. 2018.

FERRO, F. S.; SOUZA, A. M.; ARAUJO, I. I.; ALMEIDA, M. M. V. D. N.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Effect of alternative wood species and first thinning wood on oriented strand board performance. **Advances In Materials Science And Engineering**, London, v. 2018, p. 1-7, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/4603710>. Acesso em: 20 nov. 2019.

FERRO, F. S.; ALMEIDA, D. H.; SOUZA, A. M.; ICIMOTO, F. H.; CHRISTOFÓRO, A. L.; LAHR, F. A. R. Influence of proportion polyol/pre-polymer castor-oil resin components in static bending properties of particleboards produced with Pinus sp. **Advanced Materials Research**, Düsseldorf, v. 884-885, p. 667-670, jan. 2014a. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.884-885.667>. Acesso em: 20 nov. 2019.

FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; ALMEIDA, D. H.; SOUZA, A. M.; VARANDA, L. D.; CHRISTOFÓRO, A. L.; LAHR, F. A. R. Mechanical properties of particleboards manufactured with Schilozobium amazonicum and castor oil based polyurethane resin: influence of proportion polyol/pre-polymer. **International Journal of Composite Materials**, [s.l.], v. 4, n.

2, p. 52-55, 2014b.

FERRO, F. S.; ALMEIDA, T. H.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Physical properties of OSB panels manufactured with CCA and CCB treated *Schizolobium amazonicum* and bonded with castor oil based polyurethane resin. **International Journal Of Materials Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 5, p. 151-154, 1 out. 2016. Disponível em: <https://10.5923/j.ijme.20160605.02>. Acesso em: 20 nov. 2019.

FERRO, F. S.; ICIMOTO, F. H.; SOUZA, A. M.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFÓRO, A. L.; LAHR, F. A. R. Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) com *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 106, p. 313–320, 2015. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr106/cap07.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2019.

FIGUEROA, M.J.M.; MORAES, P.D. Comportamento da Madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 9, n. 4, p. 157-174, out./dez. 2009. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/viewFile/9547/7050>. Acesso em: 22 nov. 2018.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. **ThermoWood Handbook**. Helsinki, Finlândia, 2003. Disponível em: <https://www.thermowood.fi/>. Acesso em: 13 out. 2018.

FIORELLI, J.; LAHAR, F. A. R.; Nascimento, M. F.; Savastano Junior, H.; Rossignolo, J. A. Painéis de partículas à base de bagaço de cana e resina de mamona – produção e propriedades. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 33, n. 4, p.401-406, 20 set. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i4.9615>. Acesso em: 13 jan. 2019.

FOLLRICH, J.; MULLER, U.; GINDL, W.. Effects of thermal modification on the adhesion between spruce wood (*Picea abies* Karst.) and a thermoplastic polymer. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v. 64, 373-376, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0107-y>. Acesso em: 16 out. 2019.

FORNAZIERI JR., A. **Mamona uma rica fonte de óleo e de divisas**. São Paulo: Ícone, 1986. 71p.

FRANÇA, R. F. **Correlação estrutura/propriedades das madeiras termotratadas de *Pinus sp.* e *Eucalyptus spp.*** 2019. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

FRIHART C. R. Introduction to special issue: wood adhesives: past, present, and future. **Forest Products Journal**, Madison, v.65, p.4-8, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.13073/65.1-2.4>. Acesso em: 7 maio 2019.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials: bond formation and performance. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010.

GARCIA, A.; RECH, M. **Adesivos para a madeira e móveis**. 2011. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1547&. Acesso em: 1 nov. 2018.

GÉRARDIN P.; PETRI M.; PETRISSANS M.; LAMBERT J.; EHRHRARDT J. J. Evolution of wood surface free energy after heat treatment. **Polymer Degradation and Stability**, Essex, v.92, p.653-657, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.01.016>. Acesso em: 13 out. 2019.

GINDL W.; HANSMANN, C.; GIERLINGER, N.; SCHWANNINGER, M.; HINTERSTOISSER, B; JERONIMIDIS, G. Using a water-soluble melamine-formaldehyde resin to improve the hardness of Norway spruce wood. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 93, p. 1900–1907, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.20653>. Acesso em: 20 out. 2019.

GONÇALVES, M. T. T. **Usinagem da madeira**. Curso de Engenharia Industrial Madeireira. 18 nov. 2016. UNESP - Campus Itapeva.

GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização calorimétrica de madeiras tropicais**. 2008. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

GÜNDÜZ, G.; KORKUT, S.; KORKUT, D. S. The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. **Bioresource technology**, Mohali, v. 99, n. 7, p. 2275-2280, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.015>. Acesso em: 2 nov. 2019.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; EL BAKALI, I.; GÉRARDIN, P.; ZOULALIAN, A. **Evolution of wood hydrophobic properties during heat treatment**. In: Abstracts of the First European Conference on Wood Modification, Ghent, Belgium, 2003.

HENNING, A.; EICHHORN, K. J.; STAUDINGER, U.; SAHRE, K.; ROGALLI, M.; STAMM, M.; NEUMANN; A. W., GRUNDKE, K. Contact Angle Hysteresis: Study by dynamic cycling contact angle measurements and variable angle spectroscopic ellipsometry on polyimide. **Langmuir**, Washington, v. 20, p. 6685-6691, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/la036411l>. Acesso em: 3 dez. 2019.

HILL C. A. S. **Wood Modification: chemical, thermal and other processes**. UK: Wiley, 2006, 249p.

HOADLEY, R. B. **Understanding wood: a craftsman's guide to wood technology**. Nowtown: The Taunton Press, p. 193-197, 2000.

HSE C.; KUO M. Influence of extractives on wood gluing and finishing – a review. **Forest Products Journal**, Madison, v. 38, n. 1, p. 52-56, 1988. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/8068>. Acesso em: 12 jan. 2020.

IBÁ. **Relatório anual da indústria brasileira de árvores de 2017**: indicadores econômicos, sociais e ambientais. 2017. Disponível em: <https://iba.org/images/shared/Biblioteca>. Acesso em: 25 out. 2018.

IRLE, M. A.; BARBU, M. C.; REH, R.; BERGLAND, L.; ROWELL, R. M. Wood Composites. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC Press, 2012. Cap. 10.

IWAKIRI, S.; OLANDOSKI, D. P.; LEONHARDT, G.; BRAND, M. A. Produção de chapas de madeira compensada de cinco espécies de pinus tropicais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 71-77, 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/198050981656>. Acesso em: 14 mar. 2019.

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

JENNINGS, J.D. **Investigating the Surface Energy and Bond Performance of Compression Densified Wood**. 2003. 147 f. Thesis (Master of Science in Wood Science and Forest Products). Faculty of Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, 2003.

KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F.; ČABALOVÁ, I.; ĎURKOVIČ, J. Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. **Bioresource Technology**, Mohali, v. 144, p. 669–674, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.110>. Acesso em: 23 nov. 2019.

KAMDEM, D. P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A.. Durability of heat-treated wood. **Holz Als Roh- Und Werkstoff**, Berlin, v. 60, n. 1, p.1-6, fev. 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-001-0261-1>. Acesso em: 19 nov. 2019.

KARIZ M.; SERNEK M. Bonding of heat-treated spruce with phenol-formaldehyde adhesive. **Journal of Adhesion Science and Technology**, Utrecht, v. 24, p.1703-1716, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1163/016942410X507768>. Acesso em: 15 dez. 2019.

KARTAL, S.P.; HWANG, W.; IMAMURA, Y.; Water absorption of boron-treated and heat-modified wood. **Journal Wood Science**, Kyoto, v.53, p.454–457, 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-007-0877-9>. Acesso em: 10 nov. 2019.

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; BOLUK, Y. Effect of thermal treatment on the mechanical composition and mechanical properties of Birch and Aspen. **BioResources Technology**, Mohali, v.3, n.2, p.517-537, 2008.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1984.

KORKUT, D. S.; AKGÜL, M.; DÜNDAR, T. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. **Bioresource Technology**, Mohali, v. 99, n. 6, p. 1861–1868, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.038>. Acesso em: 10 nov. 2019.

KORKUT, D.S.; BUDACKI, M. The effects of high-temperature heattreatment on physical properties and surface roughness of rowan (*Sorbus aucuparia* L.) wood. **Wood Research**, Kyoto, v. 55, n.1, p. 67-78, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07373930903267161>. Acesso em: 10 nov. 2019.

KORKUT, D. S.; HIZIROGLU, S. Effect of heat treatment on mechanical properties of hazelnut wood (*Corylus colurna* L.). **Materials and Design**, Surrey, v.30 p.1853–1858, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.009>. Acesso em: 10 nov. 2019.

LEE, H.J.; MICHELSEN, S. Preparation of a superhydrophobic Rough Surface. **Journal of Polymer Science: Part B**, New York, v. 45, n. 3, p. 253-261, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/polb.21036>. Acesso em: 10 nov. 2019.

LENGOWSKI, Elaine Cristina. **Efeito da termorreificação nas propriedades anatômicas, físico-mecânicas e químicas das madeiras de Pinus taeda, Eucalyptus grandis e tectona grandis**. 2011. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LIMA, N. N. **Painéis laminados e particulados à base de madeiras tropicais da Amazônia**. 2011. 207 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

LIPTAKOVA, E., KUDELA, J. Analysis of the wood wetting process. **Holzforschung**, Wien, v.48, n.2, p.139-144, 1994. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1994.48.2.139>. Acesso em: 23 out. 2019.

LIU, H.; SHANG, J.; KAMKE, F. A.; GUO, K. Bonding performance and mechanism of thermal-hydro-mechanical modified veneer. **Wood Science And Technology**, v. 52, n. 2, p. 343-363, 17 jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0982-x>. Acesso em: 23 nov. 2019.

LONG, J.; HYDER, M. N.; HUANG, R. Y. M., CHEN, P. Thermodynamic modeling of contact angles on rough, heterogeneous surfaces. **Adv. Colloid Interface Sci**, Amsterdam, v. 118, p.173-190, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2005.07.004>. Acesso em: 23 nov. 2019.

LUO S.; CAO J.; WANG X. Investigation of the Interfacial Compatibility of PEG and Thermally Modified Wood Flour/Polypropylene Composites Using the Stress Relaxation Approach. **BioResources**, Raleigh, v. 8, n.2, p.2064-2073, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2064-2073>. Acesso em: 23 nov. 2019.

LUZ, A. P; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V. C. Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários. **Cerâmica**, São Paulo, n. 54, p. 174-183, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000200007>. Acesso em: 10 out. 2019.

MACEDO, L. B.; AQUINO, V. B. M.; WOLENSKI, A. R. V.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R.. Painéis híbridos de lâminas e partículas de madeira para uso estrutural. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 15-23, set. 2019. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/87161>. Acesso em: 12 jan. 2020.

MAJANO, A.M.; HUGHES M., CABO, J.L.F. The fracture toughness and properties of thermally modified *beech* and ash at different moisture contents. **Wood Science Technology**, Munique, v. 46, p. 5–21, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00226-010-0389-4>. Acesso em: 17 set. 2019.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **Produtos Florestais**, n. 27, p.121-156, mar. 2008.

MCHALE, G.; SHIRTCLIFFE, N. J.; NEWTON, M. I. Super-hydrophobic and super-wetting surfaces: Analytical potential. **Analyst**, London, v.129, n.4, p.284 – 287, 2004.

MILITZ, R. Heat treatment technologies in Europe: scientific background and technological state-of-art. In: CONFERENCE ON ENHANCING THE DURABILITY OF LUMBER AND

ENGINEERED WOOD PRODUCTS, 1., 2002, Orlando. **Proceedings**[...]. Madison: Forest Products Society, 2002. p. 1-19.

MYERS, D. **Surface, interfaces and colloids**. New York: VCH Publishers, 1990. cap. 17, p.349-357.

NAZERIAN, M.; GHALEHNO, M. D.; KASHKOOL, A. B. Effect of wood species, amount of juvenile wood and heat treatment on mechanical and physical properties of laminated veneer lumber. **Journal of Applied Sciences**, Mandsaur, v. 6, p. 980-987, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3923/jas.2011.980.987>. Acesso em: 10 ago. 2019.

OLIVEIRA, J. T.; FREITAS, A. R. **Painéis a base de madeira**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo. 1995.

OLIVEIRA, R. M. **Utilização de técnicas de caracterização de superfícies em madeiras tratadas termicamente**. 2012. 223 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

PAAJANEN, O.; HOLMBERG, H.; LAHTI, P.; KAIRI, M. Experiences with new veneer drying method. **International Wood Products Journal**, London, v. 3, p. 26-30, 10 fev. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/2042645312Y.0000000011>. Acesso em: 10 ago. 2019.

PETERSON, R. W. **Wood adhesives**. Ottawa, Forest Products Research Branch, n.1055, 1964. 27p.

PÉTRISSANS, M.; GÉRADIN, P.; EL-BAKALI, I. e SERAJ, M. Wettability of heat-treated wood. **Holzforschung**, Wien, v. 57, n.3, p.301–307, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/HF.2003.045>. Acesso em: 10 set. 2019.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; BRITO, J. O.; CORRENTE, J. E. Avaliação da termorreificação sobre a colagem na madeira de Eucalyptus saligna e Pinus caribaea var. hondurensis. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 6, p. 122-132, 2002. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr61/cap11.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. New York: Marcel Dekker, 1994.

PODGORSKI L.; CHEVET B.; ONIC L.; MERLIN A. Modification of wood wettability by plasma and corona treatments. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v.20, p.103-111, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0143-7496\(99\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(99)00043-3). Acesso em: 13 dez. 2019.

PONCSÁK, S. *et al.* Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (Betula papyrifera). **Wood Science Technology**, v. 40, p. 647– 663, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0082-9>. Acesso em: 23 ago. 2019.

POUBEL, D. S.; GARCIA, R. A.; SANTOS, W. A.; OLIVEIRA, G. L. ABREU, H. S. **Efeito da termorreificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de Pinus carieba**. Cerne, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 391–398, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00226-006-0082-9>. Acesso em: 23 ago. 2019.

PRATA, J. P. **Processo de fabricação de compensado**. Curitiba. 2006. 23p.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr95/cap02.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.

REMADE. **Adesivo à base de mamona para compensado**. Brasil: Revista da Madeira, v. 72. 2003. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=340&subject=Adesivos&title=Adesivo>. Acesso em 2 de nov. 2016.

REPELLIN, V.; GUYONNET, R. Evaluation of heat-treated wood swelling by differential scanning calorimetry in relation to chemical composition. **Holzforschung**, Wien, v. 59, p. 28-34, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/HF.2004.131>. Acesso em: 10 set. 2019.

RITTNER, H. **Óleo de mamona e derivados**. São Paulo: H. Rittner, 1996. 560p.

SALCA, E. A.; HIZIROGLU, S. Evaluation of hardness and surface quality of different wood species as function of heat treatment. **Materials and Design**, Surrey, v.62, p.416–423, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.029>. Acesso em: 3 ago. 2019.

SANDBERG, D.; KUTNAR, A. Thermally modified timber: recent developments in europe and north america. **Wood and Fiber Science**, v. 48, p. 28-39, 2016.

SANTOS, S. N. C. **Análise estrutural e de superfície de madeiras submetidas a tratamento térmico e degradadas pelo fungo *Pycnoporus sanguineus***. 85f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SANTOS, T. S.; CARVALHO, G. P.; GUIMARÃES JR., J. B.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.. Tratamento térmico de lâminas de *Pinus oocarpa* para melhoria das propriedades físicas de painéis compensados. **Enciclopédia Biosfera**, Centro científico conhecer – Goiânia, v.10, n.19, p. 1789. 2014.

SELLERS, T. **Plywood and adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, 1985. 661 p.

SERNEK, M.; BOONSTRA, M.; PIZZI, A.; DESPRES, A.; GERARDIN, P. Bonding performance of heat-treated wood with structural adhesives. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v. 66, n. 3, p. 173-180, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0218-0>. Acesso em: 12 fev. 2019.

SERNEK, M.; KAMKE, A.F.; GLASSER, W.G. Comparative analysis of inactivated wood surface. **Holzforschung**, Wien, v. 58, n. 1, p. 22-31, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/10.1515/HF.2004.004>. Acesso em: 15 out. 2019.

SHI, J.L.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using Thermo Wood process. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v.65, p.255–259, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-007-0173-9>. Acesso em: 5 jun. 2019.

SILVA, M. R. da. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de Eucalipto citriodora e Pinus Taeda**. 2012. 223 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 139 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVEIRA, A. C. **Estudo da extração por solventes do óleo de sementes de mamoneira (*Ricinus Communis* L.)**. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, p. 414-417, Varginha, 2004.

SOBCZAK, N.; SINGH, M.; ASTHANA, R. High-temperature wettability measurements in metal/ceramic systems - some methodological issues. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v.9, p.241-253, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2006.07.007>. Acesso em: 23 nov. 2019.

SOUZA, A. M. de; VARANDA, L. D.; MACEDO, L. B. de; ALMEIDA, D. H. de; BERTOLINI, M. S.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Mechanical properties of osb wood composites with resin derived from a renewable natural resource. **International Journal of Composite Materials**, [s.l.], v. 4, n. 3, p. 157-161, 1 jun. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5923/j.cmaterials.20140403.01>. Acesso em: 13 maio 2019.

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-based composite materials: panel products, glue-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. Cap. 11.

TJEERDSMA, B. F.; BOONSTRA, M.; PIZZI, A.; TEKELY, P. MILITZ, H. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Berlin, v. 56, p. 149-153, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s001070050287>. Acesso em: 22 jul. 2019.

TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **Holzforschung**, Wien, v.63, p. 102-111, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0532-8>. Acesso em: 2 out. 2019.

THOEMEN, H.; IRLE, M.; SERNEK, M. (Ed.). **Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists**. London: Brunel University Press, 2010. 283 p.

UMAÑA, C. L. A.; BRITO, E. O. Cozimento da madeira altera qualidade das lâminas. **Revista da Madeira**, n.78, ano 14, fev. 2004. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=485&subject=L%E2minas&title=Cozimento%20da%20madeira%20altera%20qualidade%20das%20l%E2minas>. Acesso em: 07 nov. 2018.

UNSAL, O.; AYRILMIS, N. Variations in compression strength and surface roughness of heat-treated Turkish river red gum (*Eucalyptus camaldulensis*) wood. **Journal of Wood Science**, [s.l.], v.51, n.4, p. 405-409, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10086-004-0655-x>. Acesso em 10 dez. 2019.

VERNOIS, M. Heat treatment of wood in France: state of the art. In: RAPP A.O. (ed.). **Review on Heat Treatments of Wood**. Paris: [S.l.], 2010, p.37-44.

VILAR, W. D. **Química e Tecnologia dos Poliuretanos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2005.

WALINDER, M. E. P.; JOHANSSON, I. Measurement of wood wettability by the Wilhelmy method, part 1. **Holzforschung**, Wien, v.55, n.1, p.21-32, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/HF.2001.005>. Acesso em: 10 nov. 2019.

WATAI, L. T. **Painéis derivados de madeira**. São Paulo, Boletim ABPM n. 52, 1987. 16p.

WEILAND, J. J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 61, p. 216–220, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0364-y>. Acesso em: 17 jul. 2019.

WILCZAK, L. **Avaliação do comportamento mecânico do adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado na produção de painéis compensados**. 2014. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

WINDEISEN, E.; BÄCHLE, H.; ZIMMER, B.; WEGENER, G. Relations between chemical changes and mechanical properties of thermally treated wood. **Holzforschung**, Wien, v. 63, p. 773–778, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/HF.2009.084>. Acesso em: 1 ago. 2019.

WU, X.; SHI, G. Production and characterization of stable superhydrophobic surfaces based on copper hydroxide nanoneedles mimicking the legs of water striders. **The Journal of Physical Chemistry B**, Washington, v. 110, n. 23, p.11247-11252, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jp056969x>. Acesso em: 19 nov. 2019.

YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment**, Oxford, v. 41, n. 12, p. 1762–1766, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017>. Acesso em: 10 out. 2019.

YOSHIMITSU, Z.; NAKAJIMA, A.; WATANABE, T.; HASHIMOTO, K. Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets. **Langmuir**, Washington, v. 18, n. 15, p. 5818-5822, jul. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/la020088p>. Acesso em: 10 out. 2019.

YUAN, Y.; LEE, T. R. Contact angle and wetting properties. In: BRACCO, G.; HOLST, B. (ed). **Surface Science Techniques**. Berlin: Springer, 2013, v. 51, p. 3-34.

ZANUNCIO, A.J.V.; NOBRE, J.R.C.; MOTTA, J.P.; TRUGILHO, P.F. Química e colorimetria da madeira de Eucalyptus grandis W. Mill ex Maiden termorretificada. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n.4, p. 765-770, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000400020>. Acesso em: 7 ago. 2019.

ZAU, M. D. L.; VASCONCELOS, R. P. de; GIACON, V. M.; LAHR, F. A. R. Avaliação das propriedades química, física e mecânica de painéis aglomerados produzidos com resíduo de madeira da Amazônia - Cumaru (Dipteryx Odorata) e resina poliuretana à base de óleo de mamona. **Polímeros**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 6, p. 726-732, dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1594>. Acesso em: 13 mar. 2018.

ZENID, G. J. *et al.* **Madeira:** uso sustentável na construção civil. 2. ed. São Paulo: Publicação IPT, 3010, 2009

ZHANG, J.L.; HAN, Y.C. Shape-Gradient Composite Surfaces: Water Droplets Move Uphill, **Langmuir**, Washington, v.23, p.6136-6141, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/la063376k>. Acesso em: 19 out. 2019.

ZHANG, J.; QU, L.; WANG, Z.; ZHAO, Z.; ELE, Z. YI, S. Simulation and validation of heat transfer during wood heat treatment process. **Results in Physics**, Moscow, v. 7, p. 3806-3812. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.09.046>. Acesso em: 19 out. 2019.