

BRUNO SANTOS FERREIRA

**Avaliação do desempenho de compensados de *Pinus taeda* submetidos a tratamento
térmico e químico**

Guaratinguetá – SP
2017

BRUNO SANTOS FERREIRA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COMPENSADOS DE *Pinus taeda*
SUBMETIDOS A TRATAMENTO TÉRMICO E QUÍMICO**

Tese apresentada ao Conselho de Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Vetorim
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Cristiane Inácio de Campos

Guaratinguetá
2017

F383a	Ferreira, Bruno Santos Avaliação do desempenho de compensados de Pinus taeda submetidos a tratamento térmico e químico / Bruno Santos Ferreira – Guaratinguetá, 2017 109 f. : il. Bibliografia: f. 104-109 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ventorim Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Cristiane Inácio de Campos 1. Termorretificação. 2. Pinus taeda. 3. Compensados de madeira. I. Título CDU 69(043)
-------	---

BRUNO SANTOS FERREIRA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”

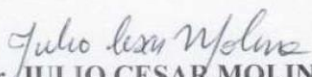
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


P/ Prof. Dr.ª Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

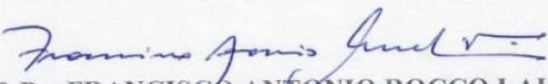
BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr.ª CRISTIANE INACIO DE CAMPOS
Coordenadora / UNESP/FEG


Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA
UNESP/FEG


Prof. Dr. RICARDO MARQUES BARREIROS
UNESP/FEG


Prof. Dr. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO
UF/São Carlos


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR
USP/EESC

Agosto/ 2017

DADOS CURRICULARES

BRUNO SANTOS FERREIRA

NASCIMENTO	29.05.1988 – ITAPEVA/SP
FILIAÇÃO	José Luiz Rodrigues Ferreira Elisabete Moraes dos Santos
2004/2005	Técnico em informática – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
2006/2011	Curso de graduação em Engenharia Industrial Madeireira – Universidade Estadual Paulista – Campus Experimental de Itapeva
2011/2013	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2013/2017	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus sem o qual nem minha vida nem este trabalho teriam sentido.
Dedico também de modo especial à minha família, de sangue e de coração.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar e acima de tudo eu agradeço a Deus, o soberano e criador de todas, sem o qual nada do que foi criado viria a existência. Eu agradeço pelo dom da vida, dada por meio de seu Filho unigênito Jesus Cristo, o qual se humilhou se fazendo homem e dando voluntariamente a sua vida para salvar todos aqueles que creem no seu nome. Não há lugar algum em minha vida onde Ele não esteja, por isso essa tese também é para Ele!

Agradeço aos meus pais, José Luiz e Elisabete, a quem amo tanto, e que me deram a oportunidade de ter feito mestrado.

Agradeço ao meu irmão Gustavo, sem o qual minha vida não seria tão feliz, a quem eu amo demais.

Agradeço ao Josmar e a Eliana, minha segunda família, pessoas que eu amo muito, que fazem parte da minha vida e da minha felicidade, que sempre têm estado ao meu lado, me ajudando em tudo.

Agradeço ao meu orientador Gustavo Ventrone e a minha coorientadora Cristiane pela grande ajuda e pelos ensinamentos tão preciosos para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos, os quais não citarei um por um, mas sabem quais são, não preciso nem dizer!

Agradeço a todos os funcionários da Unesp de Itapeva e de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e vontade de ajudar. Em especial ao Juliano Brito que esteve presente me auxiliando no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a CAPES por ter pelo apoio dado à realização desta pesquisa.

“Não há um único centímetro quadrado, em todos os domínios de nossa existência, sobre os quais Cristo, que é soberano sobre tudo, não clame: É meu!”

Abraham Kuyper

FERREIRA, B. S. **Avaliação do desempenho de compensados de *Pinus taeda* submetidos a tratamento térmico e químico**. 2017. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

O setor madeireiro tem crescido nos últimos anos no Brasil, visto que o país possui vastas áreas com florestas de reflorestamento. Entretanto, com o passar dos anos, tem crescido a consciência de uma melhor utilização das matérias-primas, inclusive da madeira. Neste contexto, surgem os painéis à base de madeira, os quais utilizam melhor as toras, que podem ser de diferentes dimensões. Dentre estes painéis, destaca-se o compensado laminado, que é um painel produzido com um número ímpar de lâminas de madeira, dispostas perpendicularmente umas às outras com relação a direção da grã. Este painel possui ampla utilização, principalmente na indústria moveleira e na construção civil, podendo ser utilizado em construções do tipo *wood frame*. Além disso, o compensado necessita passar por algum processo de tratamento contra o ataque de fungos, insetos e intempéries. Assim, este estudo teve o objetivo de analisar a influência de tratamentos preservativos nas propriedades físicas e mecânicas do compensado laminado de *Pinus taeda*. Para isso, foi realizada a termorretificação, com três diferentes temperaturas (160°C, 180°C e 200°C) e o tratamento químico com CCA. Foram realizados os tratamentos das lâminas antes da produção do compensado e os tratamentos dos painéis já produzidos, sem prévio tratamento das lâminas, com o intuito de avaliar qual forma de tratamento é a mais adequada. Foram realizadas as análises de teor de extrativos totais, molhabilidade das lâminas, microscopia eletrônica de varredura e testes físicos e mecânicos. Os resultados obtidos mostraram que os tratamentos de termorretificação e o tratamento com CCA melhoraram a estabilidade dimensional do painel compensado, devido às alterações químicas ocorridas na madeira. Além disso, ambos os tratamentos diminuíram a resistência mecânica à flexão estática e a qualidade de colagem. Entretanto, todos os tratamentos continuaram a atender as especificações mínimas de órgãos normativos. Com base em todas as análises concluiu-se que a termorretificação do painel a 200°C mostrou-se mais adequada.

Palavras-chave: termorretificação; CCA; painéis de madeira; qualidade de colagem; propriedades mecânicas.

FERREIRA, B. S. **Evaluation of *Pinus taeda* plywood performance subjected to heat and chemical treatment.** 2017. 106 f. Thesis (Doctorate degree in Mechanical Engineering) – School of Engineering of Guaratinguetá, São Paulo State University, Guaratinguetá, 2017.

ABSTRACT

The forestry sector has grown recently in Brazil, since the country has vast reforestation fields. However, over the years, there has been growing the consciousness of a better use of raw materials, including wood. In this context arise the wood based panels, which make better use of logs, which may be of different dimensions. Among these panels is highlighted the plywood, which is a panel produced with an odd number of wood veneers arranged perpendicularly to each other with respect to the grain direction. This panel has wide application, especially in the furniture industry and in construction and can be used in wood frame type construction. Besides that, the plywood needs to undergo some treatment process against the attack of fungi, insects and weatherproof. Thus, this study aims to analyze the influence of preservative treatments on physical and mechanical properties of *Pinus taeda* plywood. To this were performed the heat treatment with three different temperatures (160 °, 180 ° C and 200 ° C) and chemical treatment with CCA. It was carried out the veneers treatments before the production of plywood and the panel treatment, without prior veneers treatment, in order to assess which form of treatment is most appropriate. The analyzes of extractive content, veneers wettability, scanning electron microscopy and physical and mechanical tests were performed. The results showed that the heat treatment and CCA treatment improved the dimensional stability of the plywood due to chemical changes in the wood. In addition, both treatments decreased mechanical strength in static bending and bonding quality. However, all treatments continued to meet the minimum specifications of specialized organs. Based on all the analyzes it was concluded that the heat treatment of the panel at 200°C was more adequate.

Keywords: Heat treatment; CCA; Wood panels; Bonding quality; mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos painéis de madeira.	21
Figura 2 – Dados de produção e distribuição dos painéis de madeira reconstituída.	22
Figura 3 – Fluxograma de produção do compensado. (A) Fabricação das lâminas por torneamento; (B) Produção do painel.....	24
Figura 4 – Sistema construtivo Wood Frame.	28
Figura 5 – Formas de interação entre o adesivo e a madeira.....	31
Figura 6 – Gotas de água na superfície de uma lâmina de madeira.	31
Figura 7 – Mudança de pressão em um ciclo de tratamento de célula cheia. (a) Período de vácuo inicial; (b) Enchimento do cilindro com a solução preservante; (c) Aumento da pressão ao máximo; (d) Pressão máxima mantida; (e) Pressão retirada ; (f) Retirada da solução; (g) Período de vácuo final; (h) Vácuo retirado.	36
Figura 8 – Mudança de pressão em um ciclo de tratamento de célula vazia Rüping. (a ₁) Aplicação do ar pressurizado inicial; (b) Enchimento do cilindro, enquanto a pressão é mantida; (c) até (h) período de pressurização e vácuo final, como no tratamento de célula cheia.	37
Figura 9 – Mudança de pressão em um ciclo de tratamento de célula vazia Lowry. (b) Enchimento do cilindro com a solução preservante à pressão atmosférica; (c) até (h) período de pressurização e vácuo final, como no tratamento de célula cheia.	38
Figura 10 – Estrutura da celobiose.	41
Figura 11 – Correlação entre Módulo de Elasticidade (MOE) e o grau de despolimerização da celulose (DP).	42
Figura 12 – Açúcares básicos encontrados nas hemiceluloses.....	43
Figura 13 – Conteúdo polioses após processo de termorretificação. REF: sem termorretificação; BS1: tratamento com 160°C; BS2: tratamento com 180°C; BS3: tratamento com 200°C.....	44
Figura 14 – Desacetilação das polioses.	45
Figura 15 – Quantidade de grupos acetila no tratamento de termorretificação. REF: sem termorretificação; BS1: tratamento com 160°C; BS2: tratamento com 180°C; BS3: tratamento com 200°C.....	45

Figura 16 – Quantidade de grupos hidroxila após a termorretificação. REF: sem termorretificação; BS1: tratamento com 160°C; BS2: tratamento com 180°C; BS3: tratamento com 200°C.....	46
Figura 17 – Modelo da lignina de coníferas	47
Figura 18 – (a) Conteúdo de extrativos solúveis em solventes orgânicos; (b) Conteúdo de extrativos solúveis em água. REF: sem termorretificação; BS1: tratamento com 160°C; BS2: tratamento com 180°C; BS3: tratamento com 200°C.....	49
Figura 19 – Correlação entre Módulo de Elasticidade (MOE), Módulo de Ruptura (MOR) e Perda de massa com a porcentagem de hemicelulose na termorretificação.....	51
Figura 20 – Diagrama do processo de termorretificação.....	55
Figura 21 – Processo de produção do compensado; (A) Sobreposição das sete lâminas; (B) Pré-prensagem a frio.	58
Figura 22 – Painel produzido com sete lâminas.	59
Figura 23 – Processo de termorretificação; (A) Estufa laboratorial Marconi; (B) Empilhamento das lâminas com tabiques.	60
Figura 24 – Corpos de prova de porcentagem de perda de massa para cada temperatura e a referência.	60
Figura 25 – Tratamento com CCA; (A) Amarração das lâminas e painéis a serem inseridos na autoclave; (b) Autoclave de preservação de madeira utilizada.	62
Figura 26 – Corpo de prova de massa específica aparente.....	63
Figura 27 – Corpo de prova de inchamento em espessura.	64
Figura 28 – Corpo de prova de flexão estática.	67
Figura 29 – Ensaio de flexão estática realizado na máquina universal de ensaios EMIC.....	67
Figura 30 – Corpo de prova de cisalhamento na linha de cola.....	68
Figura 31 – Ensaio de cisalhamento na linha de cola.....	69
Figura 32 – Goniômetro digital Ramé-Hart instruments co.	70
Figura 33 – Corpos de prova de molhabilidade.....	70
Figura 34 – Sachê de papel filtro utilizado para a realização da determinação do teor de extrativos totais.	71
Figura 35 – Processo de extração; (A) Extração com etanol-tolueno e etanol; (B) Extração com banho-maria.....	72
Figura 36 – Sistema de filtração a vácuo.....	73
Figura 37 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	74

Figura 38 – Gráfico da regressão linear da perda de massa em função da temperatura de termorretificação	77
Figura 39 – Distribuição dos dados do teor de extrativos totais.....	78
Figura 40 – MEV para a lâmina de referência.....	79
Figura 41 – MEV para a lâmina termorretificada a 160°C.	79
Figura 42 – MEV para a lâmina termorretificada a 180°C.	80
Figura 43 – MEV para a lâmina termorretificada a 200°C.	80
Figura 44 – MEV para a lâmina tratada com CCA.	81
Figura 45 – Distribuição dos sais de CCA na lâmina tratada; (A) Imagem com aumento de 200 vezes; (B) Disposição do cromo – verde; (C) Disposição do cobre – vermelho; (D) Disposição do arsênio – amarelo.	82
Figura 46 – Gráfico da distribuição dos dados referentes ao ângulo de gota.....	83
Figura 47 – Gotas obtidas no goniômetro; (A) Referência; (B) 160°C; (C) 180°C; (D) 200°C; (E) CCA.....	84
Figura 48 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para a massa específica.....	87
Figura 49 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para o teor de umidade.	89
Figura 50 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para o inchamento em espessura.....	91
Figura 51 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para o cisalhamento na linha de cola.	94
Figura 52 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para o Módulo de Ruptura; (A) MOR paralelo; (B) MOR perpendicular.	97
Figura 53 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para o Módulo de Elasticidade; (A) MOE paralelo; (B) MOE perpendicular.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulações do Arseniato de Cobre Cromatado (CCA).....	39
Tabela 2 – Valores médios de perda de massa (PM) na termorretificação.	76
Tabela 3 – Resultados médios do teor de extrativos.	77
Tabela 4 – Valores médios encontrados para o ângulo de gota.....	83
Tabela 5 – Resultados obtidos nos ensaios físicos.	85
Tabela 6 – Resultados médios de massa específica aparente (ME).	86
Tabela 7 – Resultados médios do teor de umidade (TU).	88
Tabela 8 – Resultados médios de inchamento em espessura (IE).	90
Tabela 9 – Resultados obtidos nos ensaios mecânicos.....	92
Tabela 10 – Resultados médios cisalhamento na linha de cola.	93
Tabela 11 – Valores referenciais para o teste de cisalhamento na linha de cola propostos pela ABNT NBR ISO 12466-2: 2012.....	95
Tabela 12 – Resultados médios do MOR na flexão estática paralelo às fibras.	96
Tabela 13 – Resultados médios do MOR na flexão estática perpendicular às fibras.	96
Tabela 14 – Resultados médios do MOE na flexão estática paralela às fibras.	98
Tabela 15 – Resultados médios do MOE na flexão estática perpendicular às fibras.	99

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivos específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Painéis à base de madeira	20
3.2. Compensado.....	23
3.2.1. Processo produtivo do compensado	24
3.2.2. Utilização do compensado em sistemas construtivos Woodframe	27
3.4. Adesivos e adesão para a madeira	29
3.4.1. Tipos de adesivo.....	32
3.3. Tratamento preservativo químico para madeira	33
3.3.1. Métodos de tratamento	34
3.3.2. Arseniato de Cobre Cromatado (CCA)	38
3.3.3. Utilização de compostos químicos alternativos	39
3.4. Tratamento preservativo com temperatura – termorretificação.....	40
3.4.1. Celulose.....	41
3.4.2. Hemiceluloses ou polioses	43
3.4.3. Lignina	47
3.4.4. Extrativos	49
3.4.5. Influência nas propriedades físicas e mecânicas	50
3.4.6. Influência sobre o ataque de agente xilófagos	53
3.4.7. Metodologias industriais patenteadas de termorretificação	55
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
4.1. Produção dos painéis	57
4.2. Tratamentos preservativos	59
4.2.1. Termorretificação	59

4.2.2. Arseniato de Cobre Cromatado (CCA)	61
4.3. Ensaaios físicos.....	62
4.3.1. Massa específica aparente	62
4.3.2. Teor de umidade.....	63
4.3.3. Inchamento em espessura.....	64
4.4. Ensaaios mecânicos	66
4.4.1. Flexão estática	66
4.4.2. Cisalhamento na linha de cola.....	68
4.5. Teste de molhabilidade das lâminas	69
4.6. Análise do teor de extrativos totais.....	70
4.7. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	74
4.8. Análise estatística	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1. Porcentagem de perda de massa na termorretificação (PM).....	76
5.2. Análise do teor de extrativos totais na termorretificação	77
5.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	79
5.4. Molhabilidade da lâmina de madeira tratada	83
5.5. Ensaaios físicos.....	85
5.5.1. Massa específica aparente (ME)	86
5.5.2. Teor de umidade.....	88
5.5.3. Inchamento em espessura (IE)	90
5.6. Ensaaios mecânicos	92
5.6.1. Cisalhamento na linha de cola.....	93
5.6.2. Flexão estática paralela e perpendicular.....	95
5.7. Considerações finais sobre os estudos realizados.....	100
6. CONCLUSÕES	102

REFERÊNCIAS 104

1. INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro possui grande importância econômica no país, já que o Brasil apresenta uma vasta área de florestas nativas e de reflorestamento. Dentre as espécies de reflorestamento, destacam-se o pinus e o eucalipto como sendo as mais plantadas, principalmente, pelo fato de possuírem um crescimento mais rápido, adquirido muitas vezes com o melhoramento genético, e também pelo fato de o seu caule ter baixa propensão à bifurcações, resultando em toras maiores e mais retilíneas.

Apesar do Brasil possuir vasta área de florestas, com o passar dos anos percebeu-se a necessidade, cada vez maior, de racionalização da madeira, especialmente através do desenvolvimento de novas tecnologias, que além de diminuir a geração de resíduos com a melhor utilização dos recursos florestais, também melhoram algumas de suas propriedades. Com isso começaram a surgir os painéis à base de madeira (compensados, particulados e os painéis de fibras).

Os painéis à base de madeira são produtos de alto valor agregado, que podem ou não serem utilizados como elementos estruturais, de acordo com o tamanho e geometria dos elementos que compõe o painel, assim como o adesivo, que é utilizado no mesmo. Dentre as aplicações dos painéis, pode-se citar como principais a indústria moveleira e a construção civil, que consomem grande parte da produção nacional.

Um tipo de painel, que é utilizado tanto na indústria moveleira quanto na construção civil, é o compensado, que é considerado como um painel de madeira processado mecanicamente, produzido com um número ímpar de lâminas de madeira dispostas perpendicularmente umas às outras com relação à direção da grã. Esta característica de perpendicularidade das lâminas adjacentes diminui a anisotropia natural da madeira e aumenta a estabilidade dimensional, pois faz com que a diferença das propriedades nas diferentes direções diminua.

Este tipo de painel é principalmente utilizado na construção civil como elemento estrutural de paredes, pisos e tetos em construções do tipo *wood frame* e *steel frame*. Entretanto, a durabilidade deste painel, quando aplicado na construção civil, é uma questão de extrema importância, pois o mesmo sofre a ação de intempéries e agentes xilófagos. O principal desafio é melhorar ainda mais a estabilidade dimensional destes painéis, quando expostos à água, e diminuir, ou até mesmo extinguir, o ataque de agentes xilófagos.

Atualmente, o principal método de preservação utilizado é o tratamento químico em autoclave com CCA (Arseniato de Cobre Cromatado), produto tóxico que traz problemas quando o assunto é o descarte do material tratado. Métodos alternativos estão sendo

desenvolvidos para aumentar a durabilidade da madeira sem a aplicação de produtos químicos tóxicos ao homem e ao meio ambiente.

Estes métodos consistem da utilização de compostos químicos não tóxicos ou menos tóxicos ao ser humano e ao meio ambiente e, também, a utilização de métodos que não necessitam de produtos químicos, que é o exemplo da termorreificação (tratamento térmico). Tal procedimento utiliza de altas temperaturas ($>130^{\circ}\text{C}$) para tratar a madeira, alterando suas propriedades químicas, físicas e mecânicas.

Os principais fatores que implicam na termorreificação são a temperatura utilizada, o tempo de exposição da madeira, a rampa de aquecimento e resfriamento antes e após o tratamento e, também a substituição ou não da atmosfera que possui oxigênio por uma atmosfera inerte, como, por exemplo, o gás nitrogênio.

A partir do exposto, observa-se que existe a necessidade de se estudar a influência da termorreificação e do tratamento químico com CCA sobre as propriedades dos painéis de compensado, com o intuito de analisar como estes tratamentos agem sobre as propriedades físicas do painel, as quais necessitam de melhoria, afetando menos possível suas propriedades mecânicas, pois estas são de extrema importância para a utilização em construção civil.

Este trabalho, portanto, propõe o estudo do tratamento de painéis compensados por termorreificação em diferentes temperaturas e também o seu tratamento com CCA, com a intenção de analisar a viabilidade do uso destes tratamentos, especialmente da termorreificação, que é um tratamento menos agressivo, neste tipo de painel. A intenção da realização destes tratamentos é a utilização destes painéis nos sistemas construtivos do tipo *Wood Frame* e *Steel frame*, visando a maior durabilidade do material, especialmente ao ataque de agentes xilófagos. Atualmente não se encontra na literatura muitos estudos relacionados a estes tratamentos em painéis à base de madeira, portanto, este trabalho traz uma nova perspectiva para a utilização deste tipo de painel na construção civil.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a influência dos tratamentos com CCA e termorretificação nas temperaturas de 160°C, 180°C e 200°C nas propriedades dos painéis compensados de *Pinus taeda* e resina fenol-formaldeído.

2.1. Objetivos específicos

- I. Avaliar o tratamento térmico e químico na molhabilidade da superfície das lâminas;
- II. Avaliar a alteração no teor de extrativos totais na termorretificação das lâminas;
- III. Analisar a qualidade superficial da lâmina após tratamento preservativo térmico e químico através de microscopia eletrônica de varredura;
- IV. Avaliar as propriedades físico-mecânicas dos painéis produzidos em todos os tratamentos a partir de documentos normativos;
- V. Propor o melhor tratamento preservativo entre os tratamentos realizados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção apresenta-se o referencial teórico tomado como base para a realização deste trabalho. Foram tratados os assuntos relativos aos painéis à base de madeira, compensado, adesivos e molhabilidade, termorretificação da madeira e tratamento químico preservativo.

3.1. Painéis à base de madeira

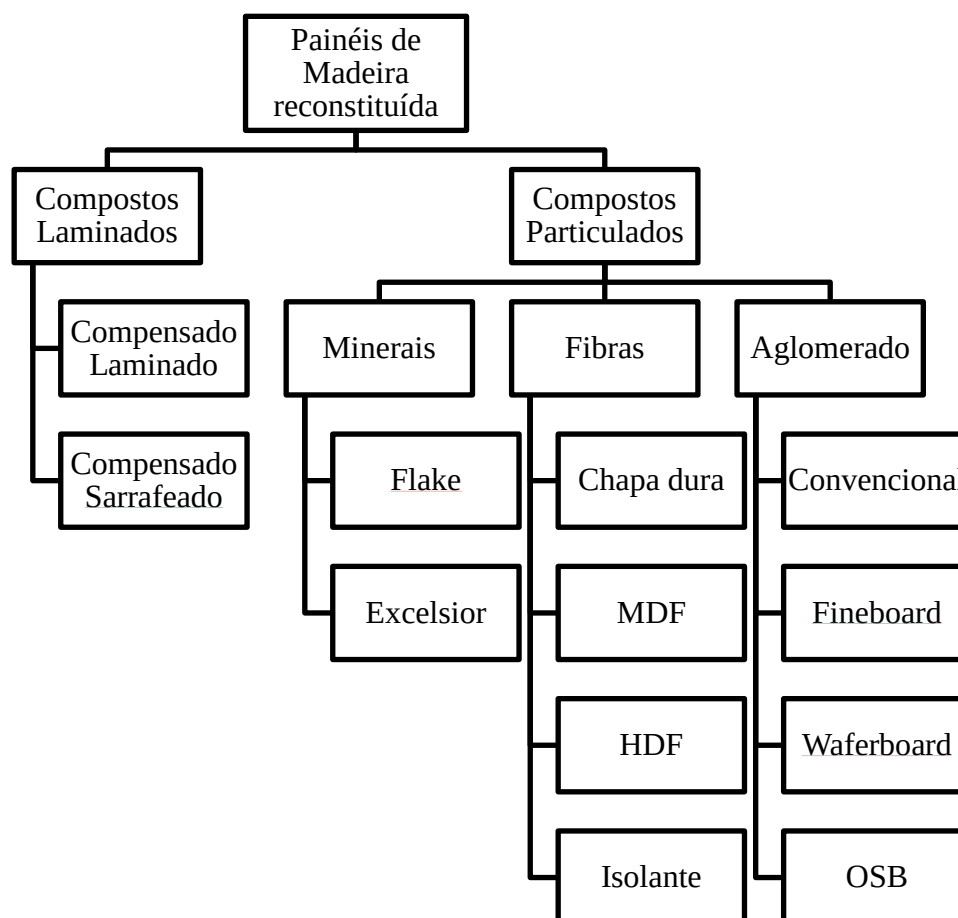
Durante muitos anos a madeira foi utilizada apenas na forma maciça, como grandes vigas e tábuas de madeira sólida, mas, com o passar do tempo, com a diminuição da disponibilidade de árvores de grandes diâmetros, e com o aumento do preço da madeira, a indústria buscou a sua substituição. Surgiram, então, produtos derivados da madeira, mais conhecidos como painéis à base de madeira. Estes podem ser produzidos através de árvores de diâmetros menores e de resíduos do processamento primário da madeira (IRLE et al., 2012).

A madeira sólida possui também alta variabilidade em suas propriedades, além de “defeitos” naturais, como nós, grã irregular, entre outros. Estes fatores podem ser diminuídos na produção de painéis de madeira, a partir da obtenção de propriedades mais homogêneas e estáveis. Sendo assim, apesar de possuírem, em alguns casos, menor resistência mecânica, são materiais mais homogêneos, que podem suportar cargas, se igualando ou até ultrapassando a madeira sólida (IRLE et al., 2012).

Portanto, os painéis de madeira, são materiais versáteis que, como substitutos para a madeira sólida, podem ser direcionados a diversas utilizações, principalmente, na construção civil e na indústria moveleira.

De acordo com Mattos, Gonçalves e Chagas (2008) os painéis de madeira podem ser divididos em dois grandes grupos, os que são feitos de madeira reconstituída (compostos de fibras ou partículas) e os confeccionados com base na madeira processada mecanicamente (lâminas ou sarrafos). A Figura 1 apresenta a classificação dos principais painéis de madeira existentes atualmente.

Figura 1 – Classificação dos painéis de madeira.



Fonte: (IWAKIRI, 2005 – adaptado).

Gonçalves (2000) classifica os painéis à base de madeira em três grupos principais:

- ✓ **Lâminas:** chapa de madeira compensada e a chapa de madeira sarrafeada;
- ✓ **Partículas:** *Medium Density Particleboard* (MDP), *Oriented Strand Board* (OSB) e Chapa de lascas não orientados (*Waferboard*);
- ✓ **Fibras:** chapa isolante, *Hard Density Fiberboard* (HDF), *Medium Density Fiberboard* (MDF).

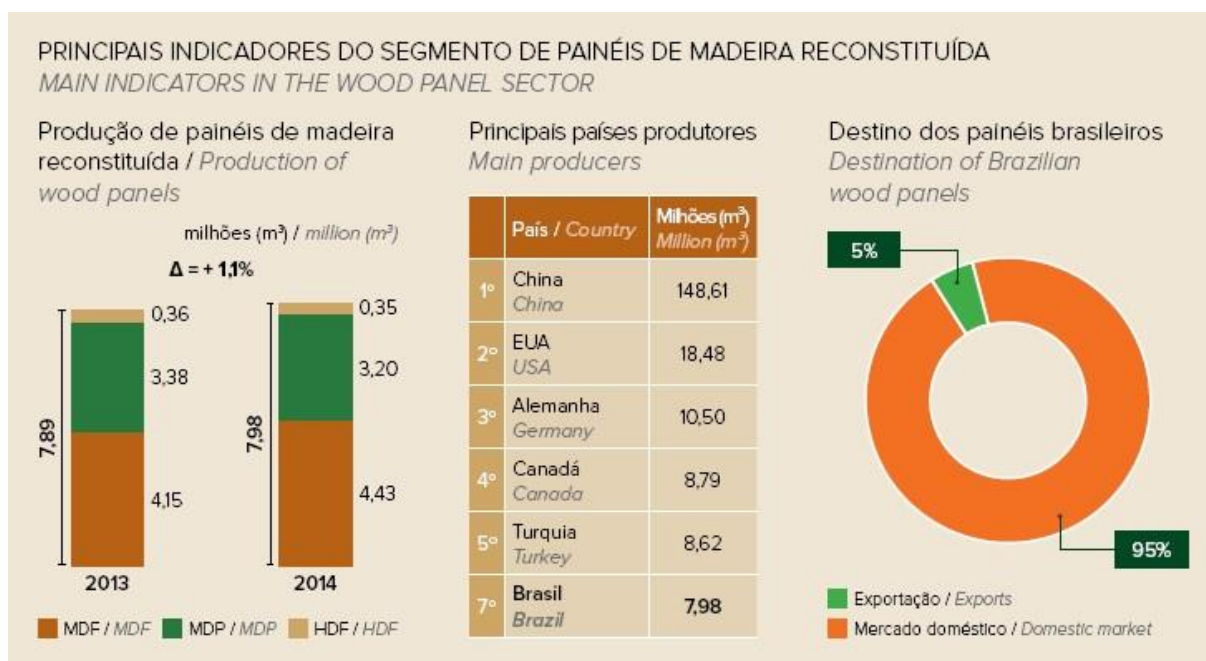
Os painéis de madeira apresentam claras vantagens com relação à madeira maciça, conforme cita Machado (2005):

- ✓ Como a possibilidade de obtenção de diferentes tipos de características geométricas (independente do porte da árvore – altura, diâmetro e forma do tronco);
- ✓ Versatilidade através de uma rápida adaptação às exigências de mercado (alteração de parâmetros na linha de produção);
- ✓ Boa relação resistência-peso;
- ✓ Maior estabilidade dimensional;

- ✓ Utilização industrial de madeira proveniente de espécies florestais secundárias;
- ✓ Clara redução de desperdícios de madeira, sendo possível a incorporação de resíduos resultantes da serraria e ainda uma percentagem de casca;
- ✓ Obtenção de produtos mais homogêneos. O coeficiente de variação normalmente associado às propriedades mecânicas da madeira maciça é por volta de 15 a 40%, no compensado passa para 8 a 12% e nos aglomerados de fibras e de partículas varia somente entre 5 a 10%.

Com relação à produção de painéis de madeira reconstituída, que incluem os compostos de partículas e fibras, em 2014 foram produzidos 7,98 milhões de metros cúbicos, alta de 1,1% em relação a 2013. Na produção de MDF houve um aumento de 6,7%, todavia as produções de HDF e de MDP, para o mesmo período, obtiveram um decréscimo de 2,5% e 5,5%, respectivamente (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ, 2015). A Figura 2 apresenta alguns gráficos relativos à produção de painéis de madeira reconstituída no Brasil, principais países produtores e o destino dos painéis brasileiros.

Figura 2 – Dados de produção e distribuição dos painéis de madeira reconstituída.



Fonte: (IBÁ, 2015).

Ainda, segundo IBÁ (2015), existem no Brasil 18 unidades produtoras de painéis de madeira reconstituída, sendo que a maior parte está localizada nas regiões Sul e Sudeste do País.

Com relação aos painéis de compensado, considerado um painel de madeira processado mecanicamente, sua produção aumentou 5,7% em 2014 com relação a 2013, atingindo 2,40 milhões de metros cúbicos, devido majoritariamente pelo aumento de 22,3% das exportações deste produto, que atingiram 1,32 milhão de metros cúbicos, no ano citado. Em contrapartida, as vendas de painéis compensados no mercado interno recuaram 9,4%, totalizando 1,08 milhão de metros cúbicos em 2014 (IBÁ, 2015).

3.2. Compensado

O compensado é um exemplo de painel de madeira que pode ser utilizado tanto na produção de móveis quanto na construção civil, pois possui uso estrutural. Iwakiri (2005) define o compensado como sendo um painel fabricado através da colagem de lâminas em número ímpar de camadas, com a direção da grã perpendicular entre as camadas adjacentes. Irle (2012) afirma que comparado com a madeira sólida, as propriedades mecânicas do compensado são mais isotrópicas, e a resistência à ruptura é maior. Afirma ainda que as suas propriedades dependem do adesivo e da quantidade e qualidade das lâminas de madeira.

Os compensados possuem uma significativa resistência à flexão, e as diferenças de resistência e rigidez ao longo do comprimento e largura do painel são muito menores do que as encontradas na madeira sólida. Da mesma forma, possuem excelente estabilidade dimensional ao longo de seu comprimento e largura. Diferentemente da maioria dos painéis de madeira reconstituída, o compensado sofre pouco inchamento em espessura irreversível, quando exposto à umidade. Além disso, a forma de montagem de lâminas com direção da grã perpendicular nas camadas do compensado também o torna mais resistente a rachaduras (STARK; CAI; CARLL, 2010).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente – ABIMCI (2004a) o compensado pode ser classificado segundo seis diferentes tipos, sendo:

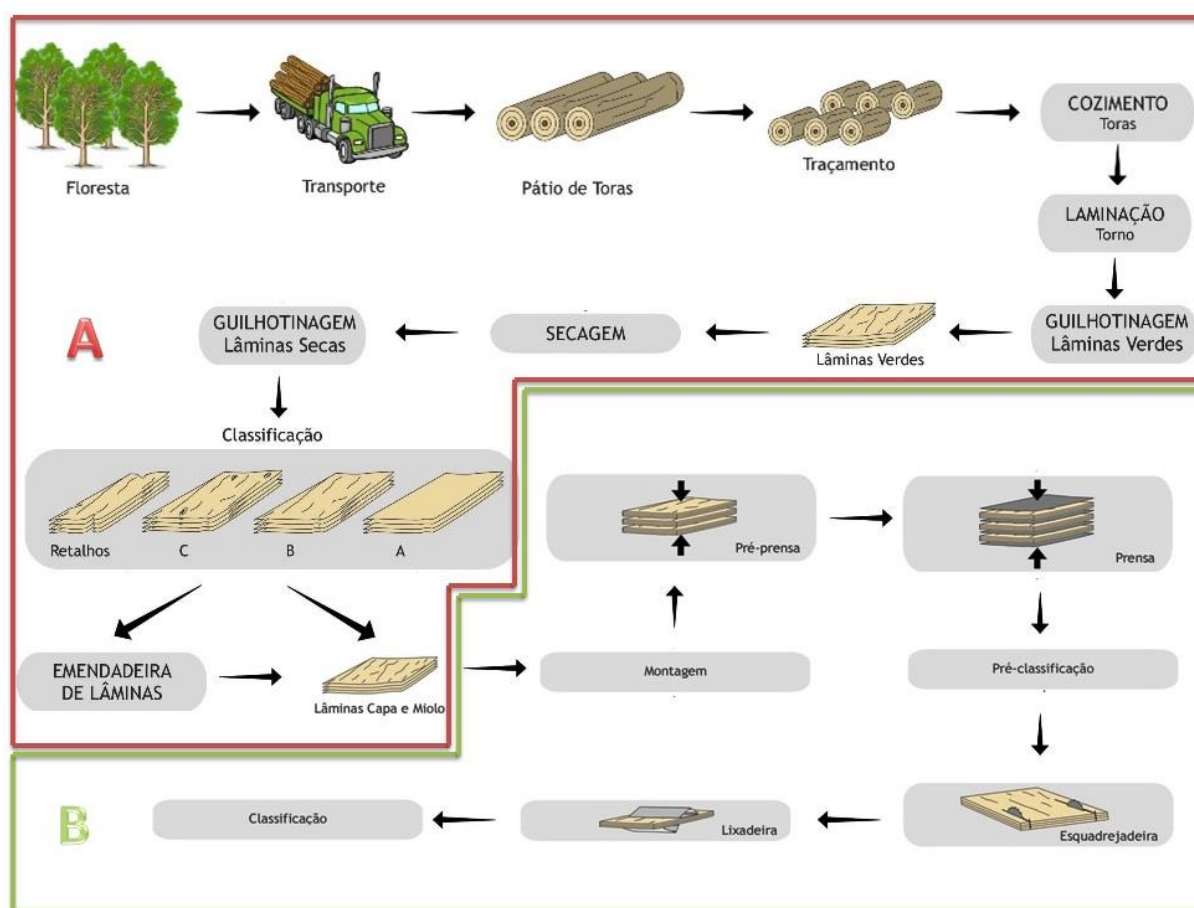
- Uso geral, utilizado comumente na construção civil e para embalagens;
- Fôrmas de concreto (resinada ou plastificada), utilizadas na construção civil;
- Uso decorativo, utilizado na indústria moveleira;
- Uso industrial, utilizado na construção civil e para embalagens;
- Uso naval, utilizado na construção civil em ambientes externos;
- Sarrafeado, utilizado, principalmente, na indústria moveleira.

Estas diferenças, estão relacionadas basicamente à qualidade das lâminas empregadas, ao local de utilização do compensado (interior e exterior) que diretamente está ligada a resina utilizada e o revestimento empregado.

3.2.1. Processo produtivo do compensado

A Figura 3 apresenta o fluxograma da produção de compensado, com suas etapas de produção, que não são necessariamente iguais para todas as indústrias de compensado.

Figura 3 – Fluxograma de produção do compensado. (A) Fabricação das lâminas por torneamento; (B) Produção do painel.



Fonte: (ABIMCI, 2004a; ABIMCI, 2004b - adaptado).

A seguir estão descritas as características das principais etapas do processo de produção dos painéis de compensado, a partir do cozimento ou aquecimento das toras:

- Aquecimento das toras:

O aquecimento das toras consiste no acondicionamento da madeira em tanques com vapor saturado ou água quente. Geralmente, são tanques de aço ou de concreto armado, abaixo do nível do solo. O acondicionamento é classificado em: vapor direto, indireto e água quente (UMAÑA e BRITO, 2004).

O aquecimento tem a finalidade de aumentar a plasticidade da madeira, tornando-a mais flexível, minimizando, desta forma, a ocorrência de fendas superficiais na lâmina durante o processo de corte (IWAKIRI, 2005).

De acordo com Baldwin (1995), depois que a madeira é aquecida, a faca desliza mais facilmente através das fibras amolecidas. Esta facilidade de corte torna possível a produção de lâminas de face provenientes do cerne e também amolece os nós. As vantagens do aquecimento podem ser traduzidas em economias mesuráveis, com:

- Maior produção de lâminas: maior quantidade lâminas em toras menores;
- Lâminas de maior qualidade: lâminas com superfícies mais lisas, com quebras reduzidas ao redor dos nós e menos defeitos, elevando a classificação das lâminas;
- Redução dos custos de trabalho: uma maior porcentagem de lâminas inteiras significa processo mais fácil e rápido. Este aumento (geralmente de 55% a 70%) resulta em menor necessidade de junção de lâminas e maior taxa de produção do aplicador de cola;
- Lâminas da face mais lisas requerem menos lixamento.

- Laminação:

A laminação de madeiras pode ser realizada através do torno, faqueadeira e serra. O método de serra é o mais antigo e praticamente não é utilizado atualmente. O torno é o equipamento mais utilizado para a produção de lâminas para compensados, e a faqueadeira é empregada para produção de lâminas decorativas (IWAKIRI, 2005).

As faqueadeiras são utilizadas em 5% do total de lâminas produzidas no país, sendo o produto final utilizado para revestimento de superfícies de painéis de madeira (compensados, aglomerados ou MDF) ou paredes. As lâminas torneadas representam 95% da produção total nacional, particularmente são utilizadas na fabricação de compensados (ABIMCI, 2004a).

No processo de torneamento as toras são fixadas por garras nas duas extremidades da tora, as quais exercem o movimento de rotação contra o gume da faca para obtenção de lâminas contínuas, a partir de uma superfície curva. Já na faqueadeira a tora é desdobrada em blocos ou pranchões de vários formatos e o faqueamento é executado de forma contínua através de cortes

planos, o que resulta em lâminas menos propensas ao fendilhamento superficial, quando comparado com o processo de desenrolamento no torno (IWAKIRI, 2005).

- Secagem:

O propósito da secagem das lâminas é de reduzir seu teor de umidade para uma faixa propícia à sua colagem (BALDWIN, 1995). Para Iwakiri (2005) “a secagem é um processo de redução do teor de umidade, com mínimo defeito, no menor tempo possível e de forma técnica e economicamente viável para o uso a que se destina”.

A secagem de lâminas de madeira, apesar de ser mais fácil que a secagem de madeiras serradas, por possuírem menores espessuras, torna-se um dos fatores mais importantes durante a fabricação do compensado, visto que, altos teores de umidade geralmente, resultam em uma colagem pobre. Em certos casos, bolhas de vapor são formadas, ocasionando descolamento e/ou material estourado. Por outro lado, um teor de umidade extremamente baixo é prejudicial, pois a lâmina, demasiadamente seca, absorve a água contida na cola, impossibilitando a adesão. Uma solução seria deixar as lâminas ressecadas, expostas à umidade ambiente, durante 24 horas (UMAÑA e BRITO, 2004)

De acordo com Baldwin (1995) existem três métodos de secagem de lâminas geralmente utilizados:

- Num clima favorável, as lâminas podem ser secas ao ar livre, sendo arranjadas de uma forma que facilite a passagem de ar pelas superfícies;
- Estufa de secagem, onde as lâminas são empilhadas e entabicadas e as pilhas são alocadas em uma câmara acondicionada;
- Secadores mecânicos, que transportam as lâminas por cilindros, correias, cabos ou malhas metálicas através de uma câmara aquecida. Neste método o processo de secagem, que antes levava dias, é executado em minutos.

- Aplicação do adesivo:

A aplicação do adesivo nas lâminas deve ser feita de forma uniforme e na quantidade adequada sobre a área que será colada, para que, no processo de prensagem, o adesivo possa fluir uniformemente através das camadas de lâmina. Esta aplicação pode ser realizada em uma ou nas duas faces da lâmina. A quantidade de adesivo necessária depende da espécie de madeira, qualidade da superfície, teor de umidade, tipo de adesivo, temperatura e umidade do ar, tempo de montagem e se a aplicação foi realizada em uma ou duas faces da lâmina (FRIHART e HUNT, 2010).

A aplicação do adesivo na superfície da lâmina pode ser feita através do aplicador de rolos, de spray, de cortina ou por extrusão, usualmente na gramatura de 400 g/m² (BALDWIN, 1995; IWAKIRI, 2005).

- Montagem:

A montagem é operação de sobreposição das lâminas com adesivo, de acordo com a composição pré-estabelecida e obedecendo ao princípio de laminação cruzada (IWAKIRI, 2005). É realizada levando em consideração um número ímpar de lâminas ou camadas, de acordo com a espessura desejada e também lembrando que cada lâmina deve ser colocada com a grã perpendicular a lâmina adjacente (ABIMCI, 2004b).

- Pré-prensagem:

A pré-prensagem tem como finalidade principal preparar o compensado para a prensagem final, facilitando o carregamento da prensa principal e conferindo menor tempo e melhor qualidade de colagem ao produto final (ABIMCI, 2004a). Para Iwakiri (2005), a pré-prensagem além de facilitar o carregamento da prensa, também auxilia na transferência e distribuição do adesivo entre as lâminas, aumenta a qualidade da colagem e a produtividade, e reduz os defeitos de fabricação.

- Prensagem à quente:

De acordo com Kollmann; Kuenzi e Stamm (1975), a prensagem pode ser realizada com aquecimento ou sem aquecimento. A prensagem sem aquecimento necessita de mais tempo para a cura do adesivo que a prensagem com aquecimento. Baldwin (1995) comenta que na prensagem com aquecimento, a pressão em si tem a função de promover o contato entre as lâminas, enquanto o calor tem a função de curar o adesivo.

Segundo Iwakiri (2005) o processo de prensagem a quente, mais comumente utilizado, possui as seguintes variáveis de ciclo de prensagem que devem ser controladas: pressão, temperatura e tempo de prensagem.

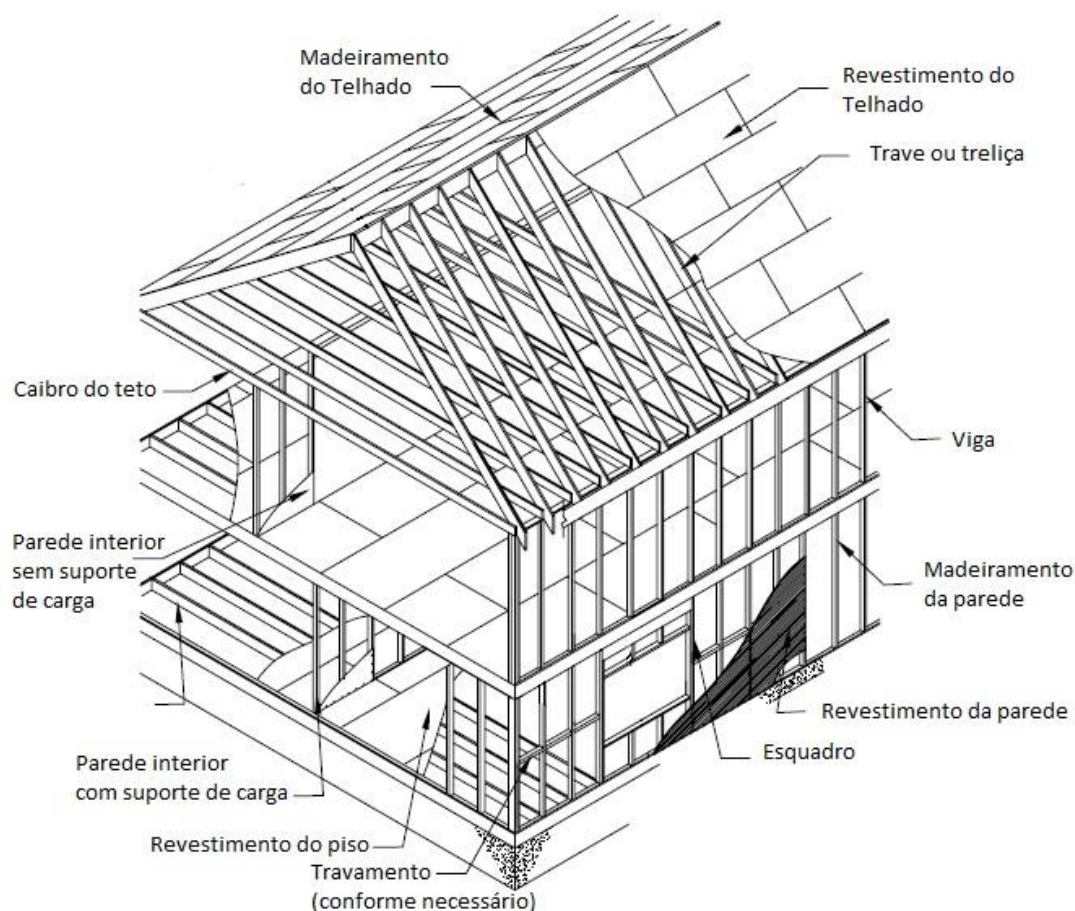
3.2.2. Utilização do compensado em sistemas construtivos *Woodframe*

A construção civil é um segmento industrial que ainda necessita de maior industrialização, de modo a racionalizar e agilizar o processo produtivo, como acontece em outros segmentos industriais. Ressalta-se que sistemas construtivos que empregam a madeira e

produtos engenheirados de madeira são bastante comuns na América do Norte, sendo que aproximadamente 90% das habitações unifamiliares utilizam a madeira como material de construção (APA, 2011). Isto pode ser justificado especialmente pela rapidez e limpeza durante a execução, elevado desempenho termo-acústico, além de custo competitivo apresentado por este material.

O sistema construtivo *Wood Frame* é composto por perfis de madeira que em conjunto com as placas estruturais formam painéis estruturais (diafragma) capazes de resistir às cargas horizontais (telhados e pavimentos), perpendiculares (ventos) e cortantes e, assim, transmitem as cargas até a fundação (STAMATO, 2010). Construções de *Wood Frame* são econômicas para serem construídas e possuem bom desempenho térmico, tanto para o frio quanto para o calor, além disso este tipo de construção têm demonstrado grande resistência e durabilidade (AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION, 2001). A Figura 4 apresenta um esquema do sistema construtivo *Wood Frame*.

Figura 4 – Sistema construtivo *Wood Frame*.



Fonte: (PARTNERSHIP FOR ADVANCED TECHNOLOGY IN HOUSING – PATH, 2000).

Neste sistema construtivo o compensado pode ser utilizado como fechamento de paredes, revestimento dos pisos e do teto, devido principalmente à sua alta resistência à flexão (PATH, 2000). O compensado, portanto, é um painel de extrema importância em construções de *Wood Frame*. Entretanto, é necessário que se realize um tratamento preservativo nestes painéis, para evitar a biodeterioração, por fungos ou insetos, muito comuns em países tropicais como o Brasil.

3.4. Adesivos e adesão para a madeira

Adesivo pode ser definido como um material que possui propriedades aderentes, ou seja, é uma substância capaz de manter unidos outros materiais em suas superfícies (IWAKIRI, 2005). Os adesivos têm a função de transferir e distribuir cargas entre os componentes a serem unidos, aumentando, assim, a resistência e a rigidez dos produtos derivados de madeira (FRIHART; HUNT, 2010).

Um material aderente é um material que entrando em contato com outro sofre a ação de um fenômeno chamado de adesão, que por sua vez, envolve fatores mecânicos e químicos que juntos controlam a habilidade do adesivo de unir duas superfícies de madeira (FRIHART; HUNT, 2010).

De acordo com Pizzi (1994), existem quatro teorias principais relacionadas ao fenômeno de adesão, estas teorias serão descritas abaixo:

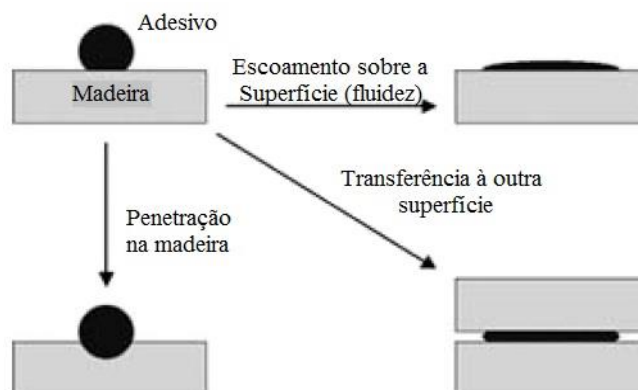
1. Teoria do emaranhamento ou intertravamento mecânico: esta teoria trata do intertravamento físico-mecânico do adesivo nas irregularidades da superfície do substrato (material sendo colado). Esta teoria indica que, para muitos casos, quanto maior for a rugosidade da superfície do substrato, maior será a adesão, devido ao intertravamento mecânico entre a superfície rugosa e o adesivo. No caso da madeira sendo colada com adesivo termofixo, outro fator importante é a penetração desse adesivo nos poros da camada mais superficial da madeira, resultando no intertravamento quando ocorre a cura do adesivo.
2. Teoria da difusão: segundo esta teoria a adesão ocorre também através da difusão de cadeias de polímeros em nível molecular, entre o adesivo e o substrato, que, neste caso, é a madeira. Esta teoria sugere que as macromoléculas de ambos possuem mobilidade suficiente e são mutualmente solúveis. Depende da cristalinidade das macromoléculas e também da solubilidade, e como a madeira é um material heterogêneo que possui regiões

amorphas e cristalinas e solubilidades diversas, pois é constituída por substâncias diferentes. Esta teoria dependerá do tipo de adesivo utilizado e da espécie de madeira.

3. Teoria eletrônica: esta teoria propõe que se o adesivo e o substrato possuem diferentes estruturas eletrônicas, podendo haver transferência de elétrons através do contato entre as duas superfícies. Isso promove uma dupla camada de cargas elétricas na interface entre o adesivo e o substrato, o que resulta em atração eletrostática, contribuindo, assim, para a adesão. Entretanto, esta teoria parece não ser possível para a madeira, pois nenhuma evidência experimental da existência desta teoria já foi registrada para a adesão na madeira.
4. Teoria da adsorção ou adesão específica: esta teoria afirma que um adesivo vai aderir à superfície do substrato devido às forças interatômicas e intermoleculares entre os átomos e as moléculas dos dois materiais. É, definitivamente, a teoria da adesão mais aceita e a mais aplicável para a madeira. No caso da adesão para a madeira os três tipos de forças intermoleculares (ligações secundárias), *van der Waals*, ligações de hidrogênio e interações eletrostáticas apresentam grande importância. Frihart (2013) afirma que a mais forte das ligações secundárias são as ligações de hidrogênio, e são também as que mais comumente ocorrem na madeira devido aos grupos hidroxila, e em alguns casos carboxila e éster, contidos em abundância tanto na madeira quanto nos adesivos. Entretanto, estas ligações são facilmente quebradas por moléculas de água, mostrando o porquê que em ambientes úmidos a colagem perde um pouco da sua resistência.

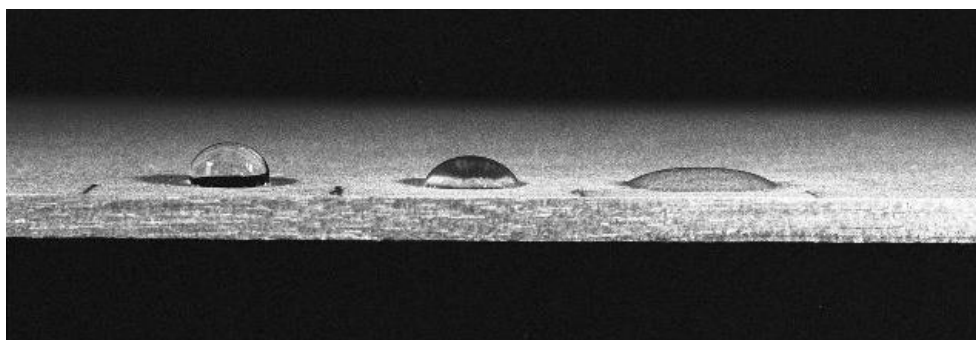
As formas de interação entre o adesivo e a madeira são a molhabilidade, a fluidez e a penetração do adesivo na madeira (Figura 5). A molhabilidade é a habilidade que uma gota do adesivo tem de formar um pequeno ângulo de contato com a superfície e pode ser melhorada através alteração da superfície por processos químicos ou mecânicos (Figura 6). A fluidez envolve o escoamento do adesivo sobre a superfície em um tempo razoável. Esta é uma característica importante, pois quanto maior a fluidez mais a superfície é coberta pelo adesivo resultando em uma colagem mais forte. A penetração do adesivo na madeira envolve a capacidade que o adesivo possui de entrar pelos vazios da superfície ou penetrar na própria parede celular. Quando a penetração é muito baixa o adesivo não penetra suficientemente na madeira para garantir uma interação madeira-adesivo forte. Quando a penetração é muito alta a linha de cola não permanece com adesivo suficiente para ligar as superfícies a serem coladas, resultando na chamada “linha de cola faminta” (FRIHART, 2013).

Figura 5 – Formas de interação entre o adesivo e a madeira.



Fonte: (FRIHART, 2013 - Adaptado).

Figura 6 – Gotas de água na superfície de uma lâmina de madeira.



Fonte: (FRIHART, 2013).

Na Figura 6 a gota da esquerda está sobre uma superfície não tratada, a do meio sobre uma superfície onde houve duas passadas de lixa 320, a da direita sobre uma superfície com quatro passadas da lixa 320.

Existem alguns fatores da madeira que podem influenciar na colagem, Frihart e Hunt (2010) citam três fatores principais:

1. O primeiro é a superfície das peças de madeira, que deve ser lisa, aplainada e livre de marcas de usinagem ou outras irregularidades, incluindo “batidas” de plaina, partes esmagadas, farpas e fibras soltas. Portanto, as condições físicas e químicas das superfícies são extremamente importantes para um resultado satisfatório, pois a colagem por adesivos consiste na união de superfícies;
2. O segundo é a densidade e a porosidade da madeira. Madeiras de alta densidade possuem um grau de dificuldade de colagem mais elevado se comparadas às de baixa densidade, pois possuem parede celular mais espessa e lúmen celular menor, dificultando a penetração do adesivo. Com relação à porosidade ocorre o mesmo,

madeiras menos porosas tem maior resistência à penetração do adesivo que madeiras mais porosas e, portanto, possuem uma colagem de menor resistência;

3. O terceiro fator é a umidade da madeira, que, segundo Currier (1961), afeta o escoamento, a transferência e a capacidade de penetração do adesivo. Teores de umidade muito baixos reduzem o escoamento e a penetração do adesivo na madeira, prejudicando a resistência da colagem, enquanto umidades altas normalmente permitem ao adesivo uma penetração excessiva para o interior da madeira, resultando em uma linha de cola pobre, reduzindo sua resistência.

3.4.1. Tipos de adesivo

A seguir estão apresentados alguns dos adesivos mais utilizados na colagem de compensados de madeira:

- Fenol-formaldeído (FF):

A resina fenol-formaldeído é grandemente utilizada em vários tipos de painéis à base de madeira por causa de sua notável durabilidade, a qual provém da sua boa adesão com a madeira, da alta resistência do polímero e de sua excelente estabilidade (FRIHART, 2013).

De acordo com Iwakiri (2005) a resina FF possui alta resistência à umidade, sendo classificada como de uso exterior. É destinada, principalmente, para a produção de compensado à prova de água, chapa dura de fibras, “*waferboard*” e “OSB”. Possui coloração marrom avermelhado, teor de sólidos entre 48 e 51%, pH na faixa de 11 a 13, viscosidade entre 300 e 600 cP e temperatura de cura na faixa de 130 a 150 °C.

Baldwin (1995) relata que a resina FF possui as seguintes desvantagens: alto custo, linha de cola de cor escura e a exigência de baixo teor de umidade da lâmina durante o processo de colagem.

- Uréia-formaldeído (UF):

A resina uréia-formaldeído possui alguns aspectos muito fortes, como: custo baixo, não inflamável, tempo de cura rápido e cor clara (FRIHART, 2013). Para Baldwin (1995) o seu baixo custo se deve ao fato de que sua matéria-prima principal consiste apenas em uréia e formaldeído, não contendo benzeno ou componentes aromáticos. Stark; Cai e Carll (2010) afirmam que dentre os adesivos termoendurecedores a uréia-formaldeído é o mais barato, e a

vantagem de possuir cor clara é que pode ser utilizada em produtos decorativos, já que a cor clara é um requisito para a produção deste tipo de produto.

Stark; Cai e Carll (2010) afirmam que a UF é aplicada em produtos de uso interior, e Baldwin (1995) recomenda que painéis colados com este tipo de adesivo não devem ser utilizados onde há a necessidade de exposição ao tempo e à temperaturas elevadas e afirma que o painel começa a delaminar por volta de 60°C e 60% de umidade relativa.

As resinas UF são produzidas em solução aquosa, com teor de sólidos entre 60 e 70%, apresentam coloração branca leitosa, pH na faixa de 7,4 a 7,8 e viscosidade na faixa de 400 a 1000 cP à 25°C (IWAKIRI, 2005).

- Melamina-formaldeído (MF):

A melamina assemelha-se à resina UF, mas oferece vantagens como uma maior resistente à água, maior estabilidade ao calor, habilidade maior de cura em temperaturas maiores e maior suscetibilidade para impregnação tanto quanto para colagem (KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975).

De acordo com Iwakiri (2005), é classificada como uso intermediário, entre UF e FF, apresenta coloração branca leitosa, possui maior resistência à água que a UF e cura mais rápida com relação a FF. Entretanto, seu custo é de 3 a 4 vezes maior que a UF e de 20 a 25% maior que a FF.

Stark; Cai e Carll (2010) e Baldwin (1995) afirmam que a resina MF pode ser utilizada em conjunto com a UF, quando, por exemplo, se necessita de uma resina que seja imperceptível por causa da cor clara em usos exteriores, pois a MF aumenta a resistência à água da UF, quando utilizadas em conjunto.

3.3. Tratamento preservativo químico para madeira

A madeira sem tratamento pode estar exposta à diversas formas de ataque de organismos xilófagos, dependendo da sua utilização e da própria espécie da madeira. Os organismos que podem degradar a madeira são principalmente: fungos e insetos, como os mais importantes e, também, as bactérias e brocas marinhas. Os fungos, dependendo da espécie, podem causar o mofo, manchas no alburno ou apodrecimento da madeira. Eles necessitam de matéria orgânica para viver; para alguns a madeira oferece a fonte de alimento necessária. Os insetos podem causar sérios danos à madeira, e devem, portanto, ser controlados, sendo que o principal exemplo de inseto que se alimenta da madeira é o cupim (CLAUSEN, 2010).

Na sua grande maioria, os tratamentos preservativos são feitos com produtos químicos, divididos em dois grupos principais: os óleos-solúveis, como o creosoto, o naftenato de cobre, o quinolinolato de cobre 8 e o óxido de tributilestanho (TBTO) e os solúveis em água, como o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), o Borato de Cobre Cromatado (CCB) e o Quaternário de cobre amoniacal (ACQ) (SCHMULSKY; JONES, 2011). Existem muitos outros produtos químicos diferentes em cada classe, e cada com sua própria eficácia em várias condições de exposição diferentes. Alguns produtos químicos preservativos podem ser formulados de forma que sejam utilizados tanto em meio hidrossolúvel quanto em meio óleo-solúvel (LEBOW, 2010).

A eficácia destes tratamentos não é avaliada somente pela toxicidade dos produtos químicos para com os fungos e insetos, mas também pelo quanto penetram na madeira e quanto realmente é retido no final do processo de tratamento, sendo que, o tratamento mais moderno é o que utiliza pressão diferencial para forçar o preservativo a penetrar na madeira, com o auxílio de uma autoclave à vácuo (SCHMULSKY; JONES, 2011).

Os produtos químicos preservativos devem atender a dois critérios gerais: (1) devem prover a proteção da madeira desejada ao seu uso final, (2) devem fazê-lo sem apresentar riscos excessivos às pessoas ou ao meio ambiente (LEBOW, 2010)

3.3.1. Métodos de tratamento

Através da história, muitos métodos de tratamento preservativo têm sido aplicados na madeira. Exemplos incluem a utilização de pinturas, ação da capilaridade da madeira através da substituição de seiva, a fervura da madeira em óleos, entre outros. Muitos destes métodos ainda são utilizados ao redor do mundo. Já processos mais modernos utilizam ciclos de pressão e vácuo para forçar o produto químico a penetrar na madeira e dependem da espécie da madeira, do tipo do preservativo utilizado e da quantidade a ser retida na madeira (SCHMULSKY; JONES, 2011).

Antes de qualquer método de tratamento, em muitos casos a madeira necessita passar por processos de pré-tratamento, os quais podem incluir: (1) secagem da madeira, muitos processos necessitam que a madeira esteja livre de umidade para que haja a penetração do líquido preservante; (2) descascamento da madeira, pois a casca é impermeável aos líquidos preservantes; (3) incisões na madeira, com o intuito aumentar a penetração da solução; (4) usinagem da madeira, a madeira devem ser usinada antes do tratamento, pois o processo de usinagem pode retirar camadas do tratamento (EATON; HALE, 1993).

De acordo com Lebow (2010) os métodos de preservação da madeira podem ser de dois tipos: (a) processos sem pressão, que variam muito com no procedimento e equipamentos utilizados; (b) processos com pressão, nos quais a madeira é impregnada em recipientes fechados sob pressões acima da atmosférica. A seguir, serão descritos alguns dos principais processos de tratamento químico da madeira:

(a) Processos de tratamento químico sem pressão, conforme Eaton e Hale (1993):

- Pincelamento: este processo utiliza escovas ou pincéis para passar a solução preservante sobre a superfície da madeira, normalmente utilizada para produtos preservativos óleo-solúveis;
- Pulverização: este processo consiste de pulverizar o preservante sobre a superfície da madeira, alcançando regiões de mais difícil acesso; ideal para aplicações corretivas de inseticidas, ou seja, quando a madeira já foi atacada pelo inseto;
- Imersão: este processo consiste em submergir a madeira por segundos, minutos, horas ou até dias, em banheiras que contenham o líquido preservante. É um processo menos utilizado, pois há uma pequena retenção da solução na madeira.

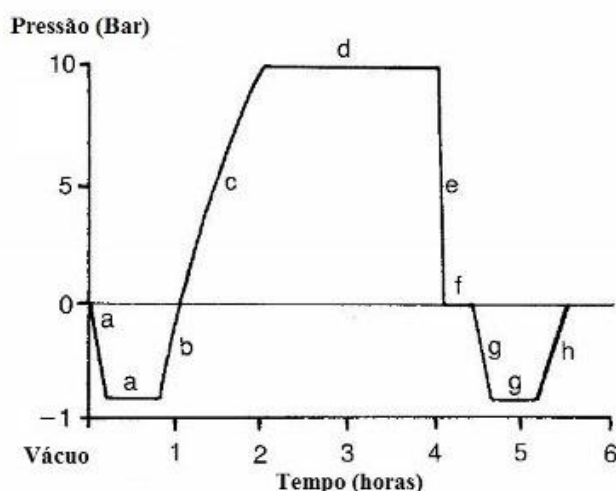
(b) Principais processos de tratamento químico com pressão:

- Célula Cheia: também chamado de processo *Bethel*, utilizado quando se deseja uma máxima retenção da solução preservante. É utilizado mundialmente para o tratamento à alta pressão em autoclave com creosoto e também soluções preservantes hidrossolúveis, principalmente, o CCA (EATON; HALE, 1993). As etapas do processo estão descritas a seguir segundo Lebow (2010):

- I. A carga de madeira é selada na autoclave, e um vácuo inicial é aplicado por cerca de 30 minutos ou mais para remover o ar de dentro do cilindro e o máximo possível da madeira;
- II. A solução preservante, à temperatura ambiente ou temperatura elevada, dependendo do preservante, é admitida no cilindro ainda sob vácuo;
- III. Após encher o cilindro, a pressão é aplicada até que a madeira não absorva mais a solução ou até que a retenção desejada de solução seja atingida;
- IV. Quando o período de aplicação de pressão finalizar, a solução é retirada do cilindro;
- V. Um curto vácuo final deve ser aplicado para que o excesso de solução seja retirado da superfície da carga de madeira, evitando, assim gotejamento.

Uma representação esquemática das mudanças de pressão em função do tempo no processo de célula cheia é apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Mudança de pressão em um ciclo de tratamento de célula cheia. (a) Período de vácuo inicial; (b) Enchimento do cilindro com a solução preservante; (c) Aumento da pressão ao máximo; (d) Pressão máxima mantida; (e) Pressão retirada; (f) Retirada da solução; (g) Período de vácuo final; (h) Vácuo retirado.



Fonte: (EATON; HALE, 1993).

- Célula vazia: o objetivo do processo de célula vazia é obter uma penetração profunda da solução preservante, com uma retenção de produto preservante relativamente baixa, e é realizado em autoclave (LEBOW, 2010). A madeira é tratada e, então, a solução é parcialmente retirada, deixando o lume das fibras menos cheio e, por isso, o processo é chamado de “célula vazia”. Existem dois processos de célula vazia, o processo *Rüping* e o processo *Lowry*, os quais se diferenciam nos estágios iniciais do tratamento (EATON, HALE, 1993).

O processo de Célula Vazia *Rüping* está descrito a seguir, de acordo com Lebow (2010):

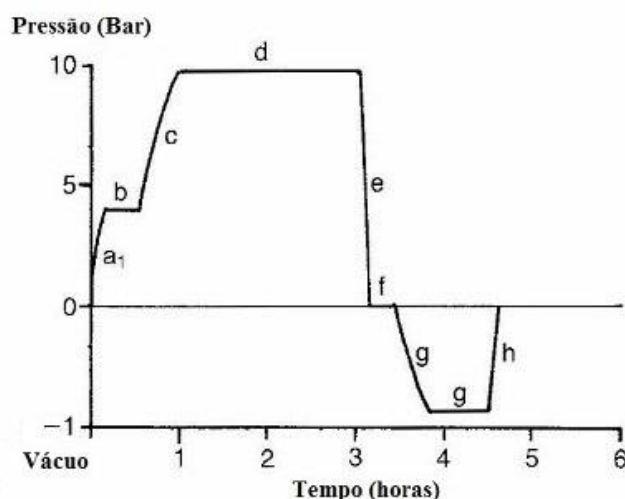
- I. Ar pressurizado é injetado no cilindro de tratamento, que contém a carga de madeira. O ar penetra na madeira em alguns minutos, dependendo da espécie. A pressão de ar aplicada, geralmente, varia de 172 a 689 kPa, dependendo da retenção de solução preservante desejada e da resistência da madeira;
- II. Após o período inicial de ar pressurizado, a solução preservante é injetada no cilindro. À medida que a solução é bombeada, o ar escapa do cilindro de tratamento para um outro cilindro, também chamado de tanque *Rüping*, em uma taxa que se mantém constante dentro do cilindro. Quando o cilindro de tratamento está cheio da solução, a

pressão de tratamento é aumentada acima da aplicada no início e é mantida até que a madeira não absorva mais o preservante, ou até que a retenção desejada seja atingida;

- III. No fim do período de pressurização, a solução é drenada do cilindro, e o preservante excedente é removido da madeira com um vácuo final. A quantidade de preservante recuperado pode ser de 20% a 60% da quantidade bruta injetada.

A representação esquemática das mudanças de pressão em função do tempo no processo de célula vazia *Rüping* é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Mudança de pressão em um ciclo de tratamento de célula vazia *Rüping*. (a₁) Aplicação do ar pressurizado inicial; (b) Enchimento do cilindro, enquanto a pressão é mantida; (c) até (h) período de pressurização e vácuo final, como no tratamento de célula cheia.

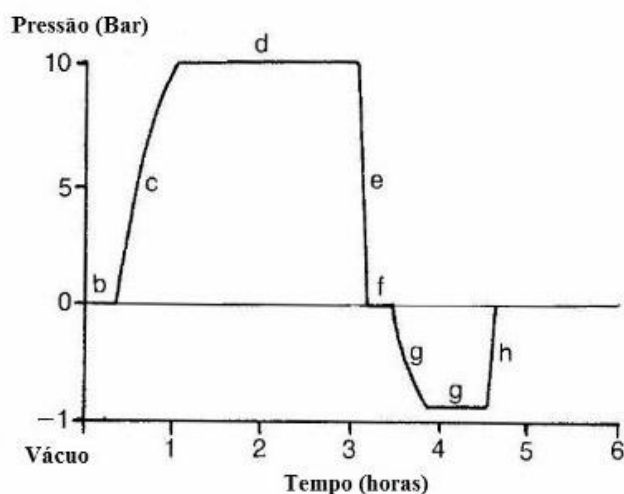


Fonte: (EATON; HALE, 1993).

O processo de célula vazia *Lowry* é frequentemente chamado de processo de célula vazia sem ar pressurizado inicial. A solução preservante é admitida no cilindro sem o ar pressurizado e o vácuo inicial, e o ar contido na madeira na pressão atmosférica fica preso durante o período de enchimento. Posteriormente ao enchimento do cilindro, a pressão é aplicada e o restante do tratamento é o mesmo que o descrito para o tratamento *Rüping* (LEBOW, 2010).

A representação esquemática das mudanças de pressão em função do tempo no processo de célula vazia *Lowry* é apresentada na Figura 9.

Figura 9 – Mudança de pressão em um ciclo de tratamento de célula vazia *Lowry*. (b) Enchimento do cilindro com a solução preservante à pressão atmosférica; (c) até (h) período de pressurização e vácuo final, como no tratamento de célula cheia.



Fonte: (EATON; HALE, 1993).

3.3.2. Arseniato de Cobre Cromatado (CCA)

É um preservativo hidrossolúvel a base de cobre, cromo e arsênio e é o preservativo de mais ampla utilização em todo o mundo. O cromo é considerado o principal responsável pela fixação do arsênio e do cobre. O arsênio e o cobre desempenham o papel de inseticida e fungicida, aderindo à parede celular da madeira, após as reações de fixação. Quando aplicado à madeira, reage com os carboidratos, lignina e extrativos, tornando-se insolúvel (GALVÃO; MAGALHÃES; MATTOS, 2004).

O CCA é aceito como um dos preservantes mais efetivos na proteção da madeira contra fungos, insetos e brocas marinhas. A característica mais importante do CCA é a sua habilidade de se fixar na madeira e resistência à lixiviação (EATON; HALE, 1993).

Segundo Valle et al. (2013), dos vários produtos utilizados na preservação de madeiras, o arseniato de cobre cromatado (CCA) é atualmente um dos preservativos mais eficientes para o tratamento da madeira, protegendo-a da podridão por fungos e da deterioração por insetos e xilófagos marinhos.

Existem três formulações diferentes: A, B e C; sendo que a formulação C é a mais utilizada, por apresentar menor lixiviação e maior desempenho (GALVÃO; MAGALHÃES; MATTOS, 2004). A Tabela 1 apresenta as composições das três formulações de CCA.

Tabela 1 – Formulações do Arseniato de Cobre Cromatado (CCA).

Ingredientes	Arseniato de cobre cromatado (porcentagem em massa)		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Cromo hexavalente <i>Calculado como CrO₃</i>	65,5	35,3	47,5
Cobre <i>Calculado como CuO</i>	18,1	19,6	18,5
Arsênio <i>Calculado como As₂O₅</i>	16,4	45,1	34,0

Fonte: (GALVÃO; MAGALHÃES; MATTOS, 2004).

Em um estudo realizado por Mendes et al. (2013), no qual se realizou o tratamento em autoclave por método de célula cheia de compensados de *Pinus taeda*, com CCA e CCB, foi percebido que os tratamentos melhoraram as propriedades de inchamento em espessura. Entretanto, diminuíram a resistência mecânica do painel, mas sem inviabilizar a sua realização.

Ferro (2013) caracterizou painel OSB produzido com madeira *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona, sendo as lascas de madeira submetidas ao tratamento com CCA e CCB. Os resultados obtidos mostraram excelentes propriedades físico-mecânicas quando comparados aos valores mínimos recomendados por normas vigentes como a EN 300 (2006) e a ASTM 14.810-2 (2006).

3.3.3. Utilização de compostos químicos alternativos

Estudos vêm sendo realizados com o intuito de avaliar a eficiência de outros compostos químicos que possuem um menor impacto ambiental, como por exemplo, em um estudo realizado por Terzi et al. (2011), que avaliou a utilização de dois compostos quaternários de amônia e três retardantes de fogo, em madeira de *Pinus sylvestris* L. e compensado com lâminas de *Betula* spp. e *Larix* spp. Foi mostrado que os retardantes de fogo apresentaram proteção menor, quando comparados com os compostos de amônia. Entretanto, com a utilização em conjunto esta proteção poderia ser potencializada, e isso ocorreu tanto para a madeira sólida quanto para o compensado.

Loh et al. (2011) produziram compensados com lâminas provenientes do tronco de uma espécie de palmeira (Oil Palm), na qual houve um tratamento prévio destas lâminas com adesivo fenol-formaldeído, com o intuito de testar o aumento da resistência dos painéis à fungos e insetos. Para isso, inicialmente as lâminas foram mergulhadas por 20 segundos no adesivo

fenol-formaldeído, retirado o excesso e, posteriormente, secas por 48 horas ao ar livre. Logo após, foi realizada a produção dos painéis, utilizando-se o adesivo ureia-formaldeído para unir as lâminas tratadas. Os painéis foram então expostos a cupins e a fungos, e percebeu-se que este tratamento aumentou em 38% a resistência ao ataque de cupins e 68% ao ataque dos fungos.

Kartal, Yoshimura e Imamura (2004) realizaram o tratamento da madeira com um composto de boro (Octaborato Dissódico Tetraidratado – DOT), que é menos poluente e mais fácil de manusear. Entretanto, possui grande lixiviação durante a posterior utilização da madeira. Portanto, foi utilizado também os compostos éter alilglicidílico (AGE) e metacrilato de metila (MMA), com o intuito de testar se haveria a diminuição da lixiviação. Os resultados mostraram que a utilização do DOT + AGE + MMA diminuiu a lixiviação do Boro, aumentou a estabilidade dimensional e também proporcionou o aumento da resistência a fungos e insetos.

Além de influenciarem na resistência à biodeterioração, estes preservativos podem influenciar também em outras propriedades da madeira. Aydin e Colakoglu (2007) analisaram a influência do tratamento preservativo com compostos de boro na rugosidade superficial, umectação da superfície da madeira e na qualidade da colagem de compensados de *Fagus orientalis*. O estudo mostrou que o tratamento preservativo, não influenciou na rugosidade superficial, mas, diminuiu a capacidade de umectação da superfície, ou seja, influenciou negativamente na absorção na fluidez do adesivo sobre a superfície. Como consequência, provocou também uma diminuição na qualidade da colagem.

3.4. Tratamento preservativo com temperatura – termorreificação

Além dos tratamentos preservativos convencionais, com os compostos químicos, podem ser realizados outros tipos de tratamento, como a termorreificação, que segundo Navi e Sandberg (2012), consiste de um tratamento realizado na madeira com a utilização da temperatura, o qual promove uma degradação controlada da madeira, principalmente das hemiceluloses, o que pode melhorar algumas de suas propriedades.

A termorreificação também pode ser definida como a termo decomposição dos constituintes químicos da madeira, principalmente celulose e hemiceluloses, geralmente na ausência de oxigênio ou de ar. Este tratamento causa alterações químicas, físicas e mecânicas na madeira, de acordo com a temperatura utilizada (RODRIGUES, 2009).

A atmosfera provoca reações de degradação durante o tratamento. Já é bem conhecido o fato de que a degradação térmica da madeira na presença de oxigênio ser muito mais rápida do que em uma atmosfera livre de oxigênio (YILDIZ; GEZER; YILDIZ, 2006).

A madeira passa por mudanças em razão de tratamentos térmicos. A extensão da alteração térmica depende de vários fatores, tais como, o estado das amostras de madeira, a carga de temperatura e a duração do tratamento (WINDEISEN; WEGENER, 2008).

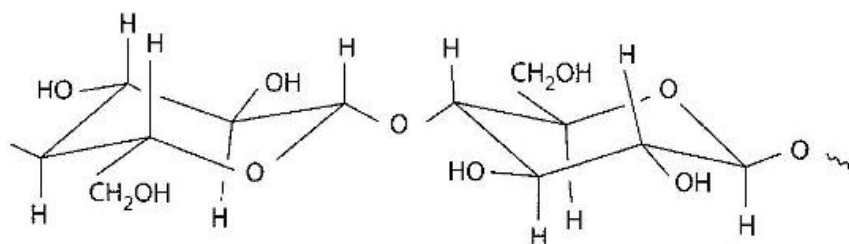
A madeira é um material complexo, constituído principalmente de celulose (40-45%), hemiceluloses (20-30%) e de lignina (20-20%). A celulose representa a parte cristalina da madeira, enquanto que as estruturas das hemiceluloses e da lignina são amorfas. A principal função das hemiceluloses e da lignina é a de suporte das microfibrilas de celulose (SWEET; WINANDY, 1999). Estes três constituintes principais e os extrativos são modificados pela termorretificação, estas modificações serão explicadas com mais detalhes a seguir.

3.4.1. Celulose

A celulose é uma molécula pertencente a função química dos carboidratos e é um polissacarídeo formado por unidades do monossacarídeo β -D-glicose, que se ligam entre si através dos carbonos 1 e 4, dando origem a um polímero linear (D'ALMEIDA, 1988).

O monômero da celulose é na verdade a celobiose, que são duas unidades de glicose ligadas entre si (Figura 10). O número de unidades de glicose na molécula de celulose se refere ao seu grau de polimerização (GP). A celulose na madeira pode também ser classificada como celulose cristalina e não-cristalina, acessível e não-acessível. (ROWELL; PETTERSEN; TSHABALALA, 2013)

Figura 10 – Estrutura da celobiose.



Fonte: (D'ALMEIDA, 1988).

A celulose sofre influência direta da temperatura na termorretificação. Um exemplo disso é o aumento da cristalinidade da celulose. Bhuiyan, Hirai e Sobue (2000), mostraram que este aumento ocorre através da cristalização das regiões quase cristalinas e/ou amorfas da celulose, devido a reorganização ou reorientação das moléculas de celulose dentro destas regiões. Mas há, também, cristalização das hemiceluloses, que são naturalmente amorfas. A degradação das

regiões amorfas (celulose e hemicelulose) também promoveu um aumento relativo da cristalinidade, pois houve diminuição da região amorfa.

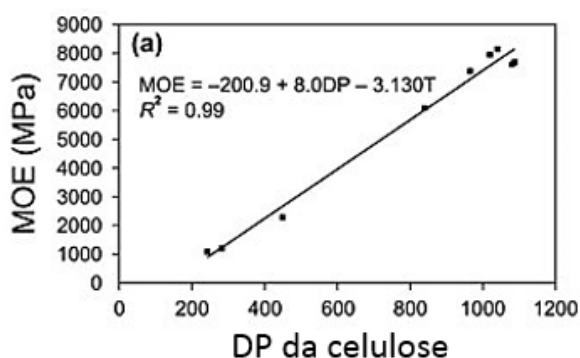
Quando na presença de umidade a madeira apresenta o dobro de cristalização na termorretificação se comparado à madeira seca. Entretanto, em estágios mais avançados, ou seja, em tempos maiores de termorretificação a cristalinidade diminui, pois há quebra das ligações glicosídicas e a despolimerização terminal das cadeias de celulose cristalinas (BHUIYAN; HIRAI; SOBUE, 2000).

Outros autores também comprovaram que a cristalinidade da celulose aumenta com a termorretificação e que ela é devido a degradação das regiões menos ordenadas da celulose, ou seja, regiões amorfas e também devido à degradação da celulose (YILDIZ; GÜMÜŞKAYA, 2007; WIKBERG; MAUNU, 2004).

De acordo com Kačíková et al. (2013), a cristalinidade da celulose se manteve constante até 220°C e aumentou a partir desta temperatura. O grau de polimerização, que mede basicamente o tamanho da cadeia de celulose, se manteve praticamente inalterado até temperaturas de 158°C, começando, então, a diminuir; e a partir de 220°C decresceu muito rapidamente e alcançou uma degradação muito intensa a partir de 250°C. Além disso, acima de 220°C houve uma grande perda de massa de madeira, indicando uma grande degradação geral, não apenas da celulose. Conforme Poubel et al. (2013), só há redução do teor de celulose cristalina, de forma significativa, em temperaturas de termorretificação acima de 220°C.

A celulose é considerada como a principal responsável pela resistência da fibra da madeira. Desta forma, quando o grau de polimerização da celulose diminui, consequentemente a resistência da madeira diminui (SWEET; WINANDY, 1999). O gráfico da Figura 11 mostra uma alta correlação entre o módulo de elasticidade (MOE) e o grau de polimerização da celulose (DP).

Figura 11 – Correlação entre Módulo de Elasticidade (MOE) e o grau de despolimerização da celulose (DP).

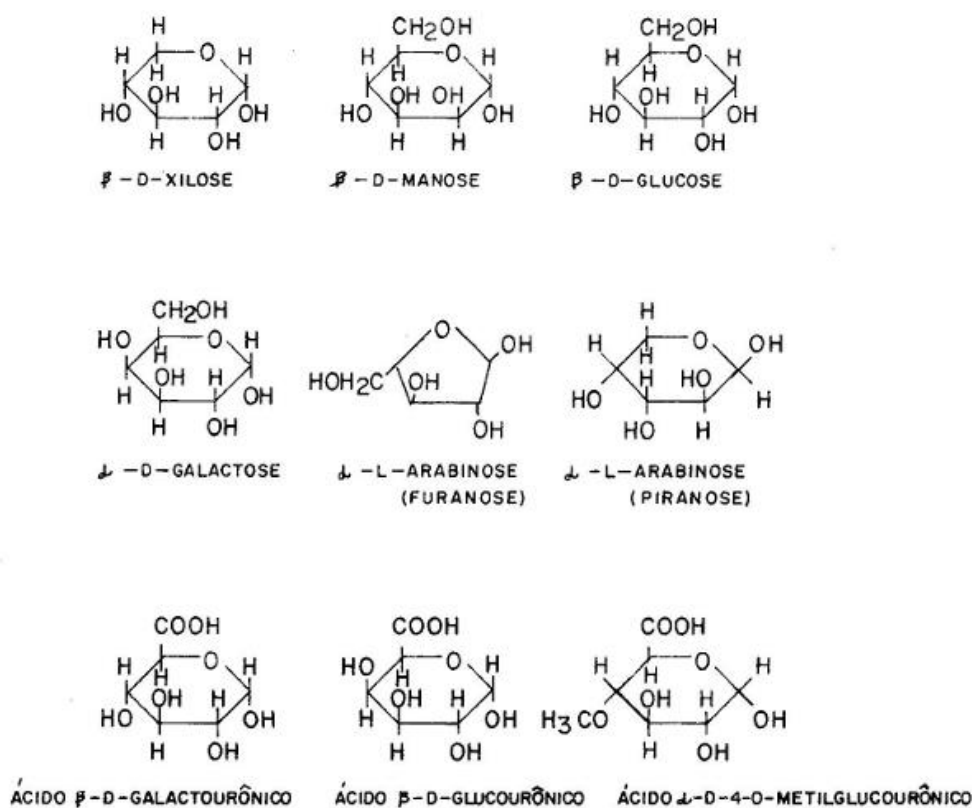


Fonte: (KAČÍKOVÁ et al., 2013).

3.4.2. Hemiceluloses ou polioses

No geral, as hemiceluloses da madeira consistem em um conjunto de polímeros de polissacarídeos com baixo grau de polimerização (GP) e contém principalmente os açúcares apresentados na Figura 12 (ROWELL; PETTERSEN; TSHABALALA, 2013). As hemiceluloses devido à ausência de cristalinidade, baixa massa molecular e sua configuração irregular e ramificada, absorvem água facilmente (D'ALMEIDA, 1988).

Figura 12 – Açúcares básicos encontrados nas hemiceluloses.



Fonte: (D'ALMEIDA, 1988).

Coníferas e folhosas possuem composições e porcentagens diferentes de polioses: as coníferas contêm em abundância a manose e mais galactose que as folhosas. As folhosas, por sua vez, contêm em abundância a xilose e mais grupos acetila que as coníferas (FENGEL E WEGENER, 1989).

Na termorreificação as polioses são degradadas mais rapidamente que a celulose, ou seja, possuem menor estabilidade térmica devido à sua natureza amorfa (falta de cristalinidade) e menor massa molecular quando comparadas à celulose (GONZÁLEZ-PEÑA; CURLING; HALE, 2009; YILDIZ; GEZER; YILDIZ, 2006). Os teores de arabinose, manose, galactose e

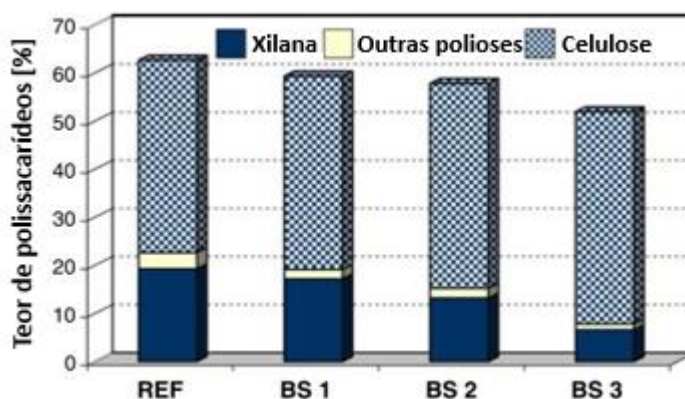
xilose da madeira decresceram significativamente com o tratamento térmico (NAZERIAN; GHALEHNO; KASHKOOL, 2011).

Temperaturas acima de 190°C promovem uma grande degradação das polioses, ou seja, uma temperatura mais baixa quando comparada à temperatura de degradação da celulose, de 220°C. Isso é causado pela menor estabilidade térmica que as hemiceluloses tem com relação à celulose, provavelmente devido à sua falta de cristalinidade. Portanto, acima de 220°C há uma intensiva degradação das holoceluloses (celulose + polioses), em ambos os casos isso foi resultado de reações de despolimerização e formação de compostos voláteis durante a degradação térmica (KAČÍKOVÁ et al., 2013).

Devido a esta estrutura amorfa e ramificada com diferentes unidades monoméricas, as polioses são muito mais suscetíveis à degradação térmica que outros constituintes poliméricos da madeira. No tratamento térmico com temperaturas de 200°C o conteúdo de xilana cai para cerca de 1/3 do conteúdo original em uma folhosa. Entretanto, esta degradação aumenta a durabilidade da madeira (WINDEISEN; STROBEL; WEGENER, 2007).

A Figura 13 apresenta esta diminuição na quantidade de polioses com o aumento da temperatura de termorretificação.

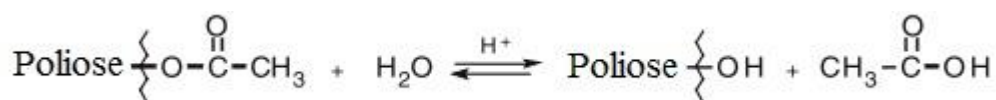
Figura 13 – Conteúdo polioses após processo de termorretificação. REF: sem termorretificação; BS1: tratamento com 160°C; BS2: tratamento com 180°C; BS3: tratamento com 200°C.



Fonte: (WINDEISEN; STROBEL; WEGENER, 2007).

Um importante composto volátil formado na degradação das polioses é o ácido acético, que é formado através da desacetilação dos grupos acetila da cadeia lateral das polioses, conforme reação da Figura 14. A formação deste composto é de extrema importância, pois ele servirá de catalisador na despolimerização de carboidratos menos ordenados, como a região amorfa da celulose (WIKBERG; MAUNU, 2004).

Figura 14 – Desacetilação das polioses.

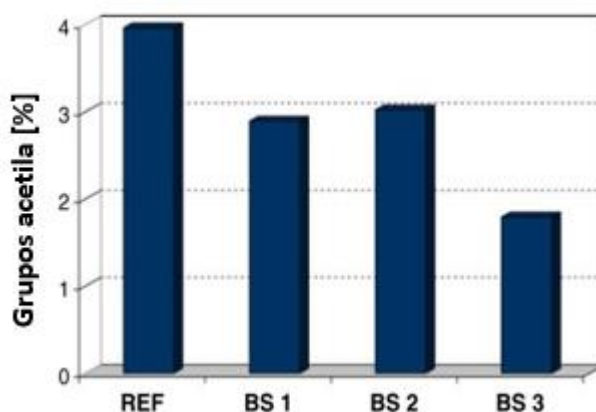


Fonte: (TJEERDSMA; MILITZ, 2005)

Este ácido acético, além de catalisar a reação de clivagem da celulose e de outras polioses, através da redução do grau de polimerização e a formação de aldeídos nas cadeias, causa também a clivagem da lignina (TJEERDSMA et al., 1998).

No estudo realizado por Windeisen, Strobel e Wegener (2007), a diminuição da quantidade de grupos acetila nos carboidratos na termorretificação pôde ser observado, o que indica a produção de ácido acético (Figura 15). Quando comparados à madeira sem tratamento, os tratamentos com 160°C e 180°C apresentaram diminuição de grupos acetila. Entretanto, entre eles não houve diferença. Por sua vez, para a temperatura de 200°C a diminuição foi ainda maior, chegando a menos da metade do valor do conteúdo natural de grupos acetila. Entretanto, não só a produção de ácido acético demonstrou a diminuição dos grupos acetila, mas a própria degradação das polioses também.

Figura 15 – Quantidade de grupos acetila no tratamento de termorretificação. REF: sem termorretificação; BS1: tratamento com 160°C; BS2: tratamento com 180°C; BS3: tratamento com 200°C.



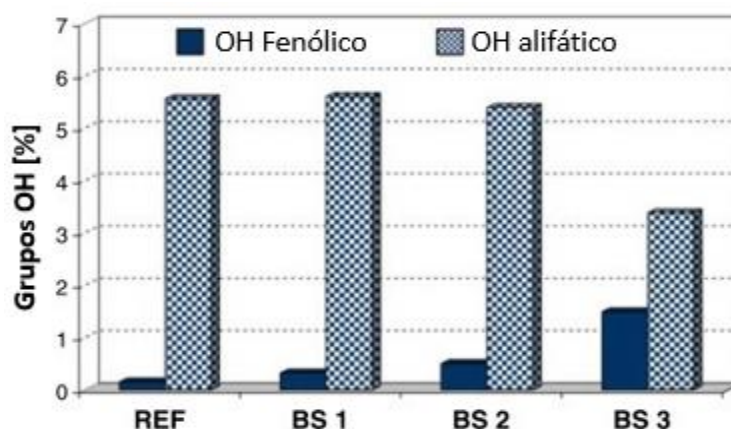
Fonte: (WINDEISEN; STROBEL; WEGENER, 2007).

Outro forte indicador da presença de ácido acético nas amostras tratadas termicamente é o pH. No estudo feito por Windeisen, Strobel e Wegener (2007), o menor pH encontrado nas madeiras termorretificadas foi de 4, indicando uma maior acidez após o tratamento. Portanto, isto fortalece a tese de produção de ácido acético através da clivagem dos grupos acetila das polioses.

Outra reação que ocorre nas hemiceluloses durante a termorretificação é a esterificação de grupos hidroxílicos, o que resulta na diminuição da higroscopicidade da madeira e, conseqüentemente, a melhora da sua estabilidade dimensional. Esta, por sua vez, também é melhorada através da reticulação da celulose e da lignina, tornando estas macromoléculas mais condensadas e menos higroscópicas (TJEERDSMA; MILITZ, 2005).

Windeisen, Strobel e Wegener (2007), mostraram em seu estudo a diminuição dos grupos hidroxílicos alifáticos, durante a termorretificação, ocorrendo principalmente na temperatura mais elevada de 200°C (Figura 16). Nesta temperatura a quantidade de grupos hidroxílicos alifáticos foi reduzido à 60% se comparado à madeira sem termorretificação. Esta diminuição foi devido às reações de oxidação e desidratação que ocorreram nestas temperaturas mais elevadas. Os grupos hidroxílicos alifáticos ainda encontrados na madeira, como pode ser visto na Figura 16, são provenientes da celulose, pois esta é termicamente mais estável que a hemicelulose, portanto, seus grupos ainda hidroxila ainda permanecem, enquanto que os grupos hidroxila das hemiceluloses já foram degradados.

Figura 16 – Quantidade de grupos hidroxila após a termorretificação. REF: sem termorretificação; BS1: tratamento com 160°C; BS2: tratamento com 180°C; BS3: tratamento com 200°C.



Fonte: (WINDEISEN; STROBEL; WEGENER, 2007).

Teoricamente, a disponibilidade dos grupos OH das hemiceluloses tem o efeito mais significativo nas propriedades físicas da madeira. O tratamento térmico diminui a captação de água e a parede celular absorve menos água pela diminuição da quantidade de grupos hidroxila. Como consequência da redução dos grupos hidroxila o inchamento e a retração são menores (GÜNDÜZ; KORKUT; KORKUT, 2008).

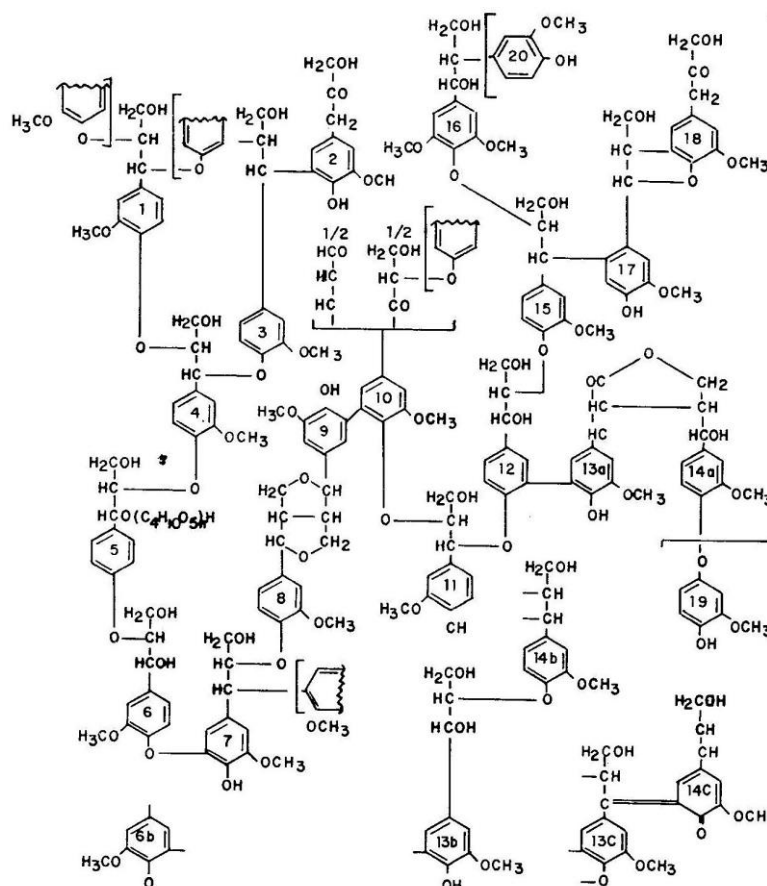
3.4.3. Lignina

A lignina é uma macromolécula amorfa, altamente complexa, principalmente aromática, formada por unidades de fenilpropano. Sua estrutura tridimensional é feita através de ligações C-O-C e C-C. Os precursores da lignina são álcool p-cumarílico, álcool coniferílico e o álcool sinapílico (ROWELL; PETTERSEN; TSHABALALA, 2013). A Figura 17 apresenta um modelo de lignina de coníferas.

A lignina confere rigidez à parede celular e, nas partes da madeira, age como um agente permanente de ligação entre as células, gerando uma estrutura resistente ao impacto, compressão e dobra (D'ALMEIDA, 1988)

A lignina é o componente mais estável da madeira em comparação com a celulose e as hemiceluloses, mas a temperatura também causa mudanças químicas na sua estrutura. À temperaturas mais baixas, ocorre a despolimerização da lignina, enquanto que em temperaturas mais elevadas ocorre sua condensação (KAČÍKOVÁ; KAČÍK; BUBENÍKOVÁ, 2008; KAČÍKOVÁ et al., 2013).

Figura 17 – Modelo da lignina de coníferas



Fonte: (ADLER, 1977 *apud* D'ALMEIDA, 1988).

A quantidade de lignina aumenta durante o tratamento térmico com o aumento do tempo e da temperatura (YILDIZ; GEZER; YILDIZ, 2006). Entretanto, este aumento é relativo e acontece devido a degradação térmica da celulose e das hemiceluloses e também às reações de condensação da lignina que ocorrem (KAČÍKOVÁ et al., 2013; BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006).

No estudo realizado por Kamdem, Pizzi e Jermannaud (2002), o aumento na porcentagem de lignina encontrado, foi maior para a madeira *beech* (folhosa) que para as coníferas, e isto pode ser devido ao fato de que as pentoses das folhosas são mais instáveis que as hexoses das coníferas, havendo, portanto, uma menor degradação das hemiceluloses nas coníferas do que nas folhosas.

Wikberg e Maunu (2004) perceberam que a lignina das folhosas sofreram quebras na sua estrutura devido à clivagem das suas ligações β -O-4. Já na lignina das coníferas, além da quebra das ligações β -O-4, houve também a desmetoxilação que levou à uma estrutura mais condensada. Tjeerdsma et al. (1998) afirmam que esta autocondensação da lignina através da formação de pontes de metil entre os anéis benzênicos começam a ocorrer já no início da termorretificação. González-Peña, Curling e Hale (2009) notaram que houve uma condensação de sub-produtos da degradação da holocelulose na macromolécula de lignina, os quais permaneceram ligados após a repolimerização da lignina.

A extensão destas reações é muito leve, mas, no entanto, resultam num aumento de ligações cruzadas entre a lignina e os carboidratos (celulose e hemicelulose) aumentando, assim, a higroscopicidade e a estabilidade dimensional da madeira, pois torna a estrutura menos acessível à água (TJEERDSMA et al., 1998).

A clivagem das ligações β -aril-éter da lignina se mostraram como umas das principais reações de despolimerização (BROSSE et al., 2010). As ligações aril-glicerol- β -aril-éter diminuíram significativamente devido ao tratamento térmico. Desta forma, a lignina perdeu, após o tratamento, grande parte das suas ligações aril-alquil-éter. Portanto, mudanças nas ligações da lignina são evidentes como resultado da termorretificação. Assim, processos mais longos levam a mudanças mais fortes nas ligações originais da lignina (WINDEISEN; WEGENER, 2008).

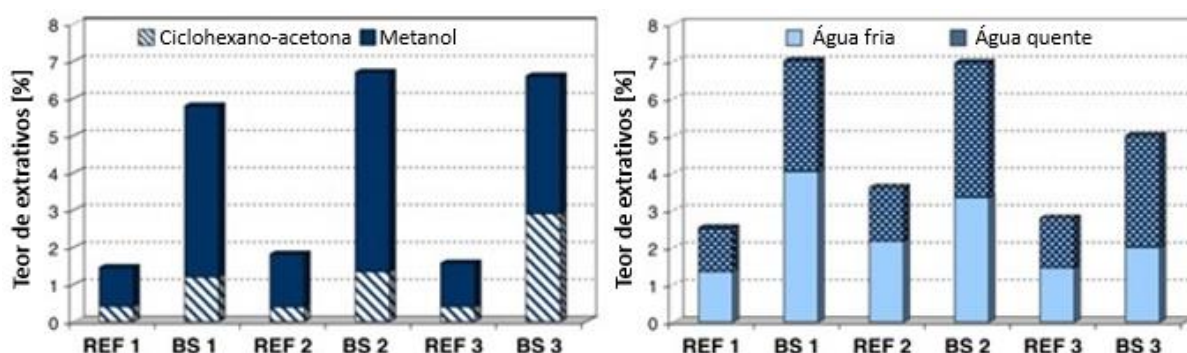
Nenhuma mudança muito significativa da lignina foi encontrada nas temperaturas de até 200 °C. Entretanto acima de 250°C alterações muito significativas já são encontradas, e são derivadas de reações de condensação da lignina na lamela média (WINDEISEN; WEGENER, 2008).

3.4.4. Extrativos

Durante o processo de aquecimento, a lignina e os carboidratos (celulose e hemiceluloses) são gradualmente convertidos em compostos voláteis e extrativos, os quais, por sua vez, são parcialmente degradados juntamente com os extrativos naturais da madeira (YILDIZ; GEZER; YILDIZ, 2006).

No estudo realizado por Windeisen, Strobel e Wegener (2007), notou-se que o aumento de extrativos decorrente da ação do tratamento térmico comparados com os valores de referência (Figura 18) demonstrou degradações distintas ocorrendo na madeira. No que se refere aos solventes orgânicos da Figura 18a, pode-se notar um aumento na quantidade de extrativos solúveis em ciclo-hexano (solvente apolar) e diminuição dos solúveis em metanol (polar) comparando os tratamentos BS2 (180°C) e BS3 (200°C), ou seja, houve uma mudança de polaridade. Isso é devido ao fato de a lignina nesta temperatura se tornar parcialmente solúvel. A Figura 18b apresenta os extrativos solúveis em água fria e quente comparados às referências. Pode-se notar que o aumento destes extrativos é maior para as temperaturas menores de tratamento, já que em temperaturas maiores eles volatilizam, por serem mais voláteis que os solúveis em solvente orgânicos.

Figura 18 – (a) Conteúdo de extrativos solúveis em solventes orgânicos; (b) Conteúdo de extrativos solúveis em água. REF: sem termorretificação; BS1: tratamento com 160°C; BS2: tratamento com 180°C; BS3: tratamento com 200°C.



Fonte: (WINDEISEN; STROBEL; WEGENER, 2007).

O aumento no teor de extrativos em temperaturas mais baixas pode ser explicado pela formação de subprodutos causada pela degradação das hemiceluloses enquanto a redução no teor de extrativos a temperaturas mais elevadas deve-se à volatilização dos extrativos e à polimerização desses subprodutos com outros polímeros da parede celular, fixando-se na madeira (KAMDEM; PIZZI; JERMANNAUD, 2002).

Apesar da termorretificação não afetar significativamente o teor de extrativos natural da madeira, verificou-se um aumento no mesmo para as madeiras termorretificadas a 200 °C seguido de um decréscimo para as madeiras termorretificadas a 220 °C (POUBEL et al., 2013).

3.4.5. Influência nas propriedades físicas e mecânicas

A principal consequência da termorretificação na madeira é a melhora na sua estabilidade dimensional. Isto pode ser explicado devido a degradação das hemiceluloses, como já explicado anteriormente, que ocorre através de reações de desidratação com a destruição dos grupos hidroxila. Portanto, a degradação das hemiceluloses, que são os polímeros mais hidrofílicos da madeira, devido a sua estrutura amorfa e grande quantidade de grupos hidroxila, diminuem a afinidade da madeira com a água e, desta forma, aumentando a estabilidade dimensional (WEILAND; GUYONNET, 2003).

Tjeerdsma et al. (1998) também explicam que a redução da higroscopicidade e, consequente, melhoria da estabilidade dimensional também é devido à uma rede mais firme e inelástica de lignina, que passou por reações de reticulação e condensamento, rodeando as microfibrilas de celulose. Isso faz com que a capacidade de expansão das microfibrilas de celulose diminua, e consequentemente, a sua capacidade de absorver água, impedindo que a parede celular inche, como resultado, diminuindo também o ponto de saturação das fibras.

Poubel et al. (2013) estudaram a influência da termorretificação sobre a estabilidade dimensional da madeira normal e de compressão. Concluíram que a termorretificação proporcionou menor teor de umidade de equilíbrio e menores contrações e inchamentos, independentemente do tipo de lenho (normal x compressão).

Outra propriedade da madeira que apresenta mudança com a termorretificação é a rugosidade superficial. Em um estudo realizado por Kamdem, Pizzi e Jermannaud (2002) a redução da rugosidade superficial da madeira tratada termicamente foi significativa. Outro fator notado foi o escurecimento da madeira.

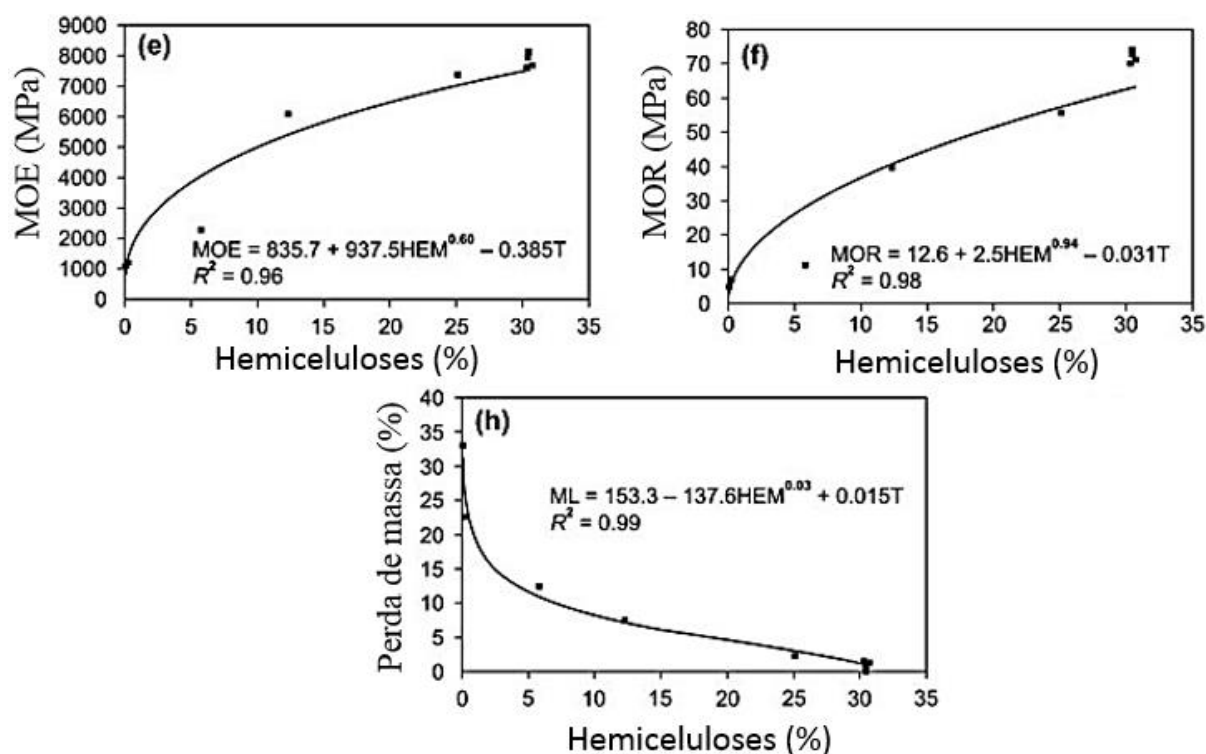
Em um estudo realizado por Yildiz, Gezer e Yildiz (2006), que realizaram o tratamento térmico na madeira da espécie *spruce* aumentando o tempo e a temperatura de tratamento, a propriedade mais importante da madeira tratada foi a redução na umidade de equilíbrio e, consequentemente, seu inchamento e contração sem a necessidade de adição de repelentes de água. No entanto, os valores de resistência à compressão desta madeira se reduziram com o aumento da temperatura e tempo de tratamento. A diminuição das propriedades de compressão

pode ser reduzida utilizando um sistema onde há a substituição do ar atmosférico por algum gás inerte, como o nitrogênio ou por vapor de água.

Além das propriedades físicas a termorretificação da madeira influencia também nas propriedades mecânicas. Entretanto, diferentemente das propriedades físicas, que possuem melhora, grande parte das mecânicas sofrem efeito negativo na termorretificação. Conforme Kačíková et al. (2013) mudanças no MOR e no MOE com o aumento da temperatura até 160°C são insignificantes, apenas um pequeno decréscimo foi observado. Entretanto, à temperaturas acima de 160°C o MOR decresceu drasticamente, devido a degradação térmica das hemiceluloses. O MOE declinou rapidamente acima da temperatura de 220°C devido a degradação também da celulose e das mudanças químicas da macromolécula de lignina.

As hemiceluloses possuem relação não somente com a estabilidade dimensional da madeira, mas também com seu desempenho mecânico. A Figura 19 apresenta a correlação existente entre a porcentagem de hemicelulose na fibra da madeira e o MOR, MOE e perda de massa decorrente da termorretificação. Segundo Sweet e Winandy (1999) as hemiceluloses possuem um papel importante para se determinar a resistência da madeira.

Figura 19 – Correlação entre Módulo de Elasticidade (MOE), Módulo de Ruptura (MOR) e Perda de massa com a porcentagem de hemicelulose na termorretificação.



Fonte: KAČÍKOVÁ et al. (2013).

Nazerian, Ghalehno e Kashkooli (2011) analisaram a influência da termorretificação sobre as propriedades de painéis LVL e constataram que o MOR e MOE destes painéis decresceram significativamente, mostrando que o tratamento térmico promove uma diminuição na resistência da madeira e consequentemente no painel LVL.

No estudo realizado por Salca e Hiziroglu (2014), os valores de dureza da madeira diminuíram com o aumento do tempo e da temperatura de termorretificação, o que pode estar relacionado com a deterioração da parede celular da madeira decorrente do tratamento. Por outro lado, houve um aumento na qualidade superficial como resultado. Segundo os autores, o estudo revelou que a madeira termorretificada possui potencial de uso efetivamente na indústria moveleira.

Outros autores também encontraram diminuição da dureza da madeira com o tratamento térmico. Poncsak, Kocaefe e Younsi (2011) constataram a diminuição da dureza de penetração da madeira de “Jack pine” nas direções radial e tangencial, mas nenhuma mudança na direção axial. Korkut et al. (2008) encontraram uma maior diminuição na dureza na direção radial seguida pela diminuição na direção tangencial da madeira e também na resistência à tração perpendicular à grã, quando a madeira foi tratada a 180°C por 10 horas.

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 de corrente da termorretificação da madeira de *Scots pine*. Além disso, os resultados mostraram que o aumento no tempo e na temperatura de tratamento resulta em maiores decréscimos destas propriedades.

Pincelli, Brito e Corrente (2002) avaliaram a influência da termorretificação sobre a colagem da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus cariebea* var. *hondurensis*. Para isso foram testadas as temperaturas de 120, 140, 160 e 180 °C e os adesivos fenol-resorcinol-formaldeído, ureia-formaldeído e acetato de polivinila (PVA). Os resultados obtidos demonstraram que para todos os adesivos e temperaturas de termorretificação, não houve influência sobre a colagem da madeira.

Gunduz, Aydemir e Karakas (2009) realizaram tratamento térmico na madeira de *Wild Pear* em três diferentes temperaturas (160°C, 180°C a 200°C) e com três diferentes tempos de tratamento (3, 5 e 7 horas). Os autores perceberam que o aumento do tempo e da temperatura de tratamento melhoraram as propriedades físicas de inchamento e absorção de água da madeira, entretanto diminuíram um pouco as suas propriedades mecânicas de flexão estática e compressão. Concluiu-se que até a temperatura de 180° C houve uma melhora nas propriedades físicas da madeira e apenas uma pequena diminuição nas suas propriedades mecânicas.

Em um estudo realizado por Awoyemi e Jones (2011) constatou-se a destruição da parede dos traqueídes, raios e pontoações da madeira de *red cedar* após o tratamento térmico. Estas mudanças na anatomia da madeira mostraram que a degradação química não é a única razão para as mudanças nas propriedades da madeira durante o tratamento. Todavia, acredita-se que os efeitos das mudanças químicas ainda sobrepõem os efeitos das mudanças anatômicas.

Pode-se perceber que a termorretificação causa melhora na estabilidade dimensional, entretanto, diminui a resistência da madeira, especialmente em temperaturas mais elevadas de tratamento, mas este aumento de estabilidade dimensional, através da termorretificação pode ser explorado se a resistência mecânica possa ser ligeiramente reduzida em determinada aplicação (PONCSAK; KOCAEFE; YOUNSI, 2011). Korkut et al. (2008) pontuaram que a melhora das características de inchamento e da rugosidade superficial da madeira termorretificada devem ser balanceadas com a redução nos valores de resistência, quando se avalia a efetividade do uso deste tratamento.

3.4.6. Influência sobre o ataque de agente xilófagos

A melhoria da durabilidade da madeira termorretificada contra fungos pode ser explicada por três teorias, de acordo com Weiland e Guyonnet (2003):

1. O tratamento térmico causa a criação de novas moléculas livres na madeira termorretificada. Estes compostos, agindo como fungicidas, podem ser considerados como novos agentes preservantes *in situ* para a madeira;
2. Algumas moléculas produzidas na degradação térmica podem reticular na macromolécula de lignina. Assim, o sistema enzimático dos fungos (particularmente a lignase) não pode mais reconhecer a madeira e, desta forma, se torna incapaz de degradá-la. A celulose também pode ser modificada através da esterificação pelo ácido acético liberado pelas hemiceluloses durante o tratamento térmico;
3. O tratamento térmico promove a eliminação das pentoses (hemiceluloses), as quais compõe os elementos nutritivos elementares da madeira, e desta forma inibe o início da colonização dos fungos.

Outros autores confirmam o fato de a degradação das hemiceluloses melhorar a durabilidade da madeira com relação ao ataque de fungos:

- Windeisen, Strobel e Wegener (2007) afirmam em seu estudo que a menor quantidade, encontrada por eles, de polioses na temperatura de termorretificação de 200°C pode ter um

papel decisivo na melhoria da durabilidade natural da madeira. Além disso, os compostos degradados podem resultar em reações de condensação e reticulação e, assim, não estarem mais disponíveis aos fungos.

- Tjeerdsma et al. (1998) atestam que as hemiceluloses, as moléculas mais hidrofílicas e de mais fácil digestão para os fungos, foram degradadas seletivamente e os produtos resultantes se tornaram uma cadeia hidrofóbica e não mais acessível aos fungos, após o tratamento térmico.

- Brosse et al. (2010) relatam que os resultados encontrados foram consistentes com o fato de que a degradação das hemiceluloses é uma das principais razões que explicam a melhoria na durabilidade da madeira termorretificada contra biodeterioração.

Hakkou et al. (2006) analisaram o ataque do fungo de podridão branca (*C. versicolor*) na madeira *beech*. Os autores perceberam que a resistência à deterioração depende da temperatura do tratamento térmico e é total quando o tratamento é feito a 280°C. Foi observada uma importante correlação entre a temperatura do tratamento e a durabilidade da madeira, indicando que a modificação química e a degradação são as hipóteses mais plausíveis para explicar a melhoria na durabilidade. Além da degradação das hemiceluloses, a qual é considerada a mais importante fonte nutritiva para o desenvolvimento do fungo de podridão branca, as modificações da macromolécula de lignina também podem explicar a ineficiência das enzimas dos fungos em degradarem a lignina.

Boonstra et al. (2007) estudando espécies de madeira diferentes e diferentes tipos de fungos xilófagos, mostraram que em todos os casos o tratamento térmico melhorou a resistência da madeira para todos as espécies de fungos testadas.

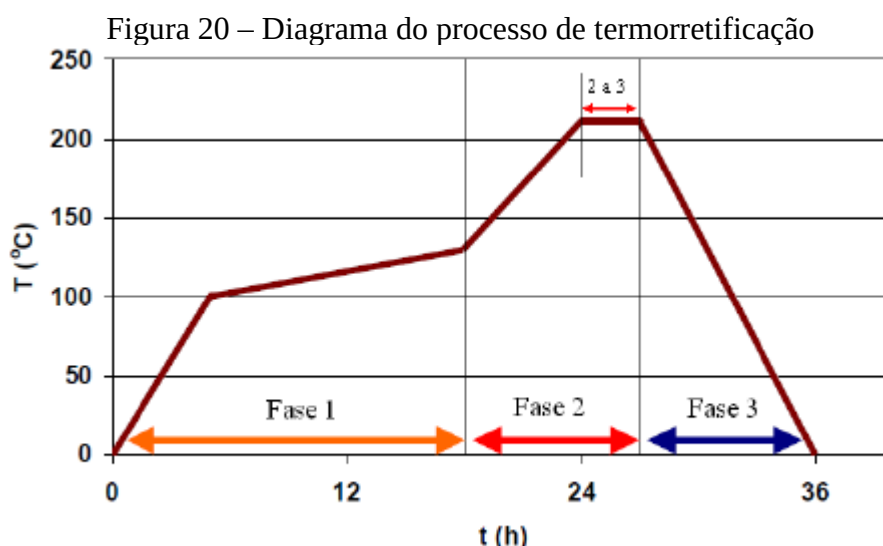
Em um estudo realizado por Pessoa, Berti Filho e Brito (2006), testou-se a influência da termorretificação, com 120, 140, 160, 180 e 200°C, na resistência ao ataque de cupins de madeira seca da madeira de *Eucalyptus grandis*. Os resultados obtidos mostraram que este tratamento não pôde eliminar por completo o ataque dos cupins. Entretanto, quanto maior foi a temperatura utilizada, menores foram os danos causados pelos cupins na madeira. Também mais cupins foram encontrados mortos, com o aumento da temperatura, devido, principalmente às substâncias exaladas pela madeira após a termorretificação, as quais poderiam ser nocivas aos cupins.

3.4.7. Metodologias industriais patenteadas de termorreificação

Existem algumas metodologias industriais de termorreificação patenteadas, podendo-se citar: o processo *Le Bois Perdure* o processo *RetiWood*, o processo *ThermoWood* e o processo *PlatoWood*. Dentre elas, umas das mais difundidas e utilizadas é a *ThermoWood*, descrita à seguir conforme relata Finnish ThermoWood Association (2003).

O processo ThermoWood consiste basicamente de três fases principais (Figura 20):

- ✓ **Fase 1:** Aumento da temperatura e secagem à alta temperatura – Usando calor e vapor, a temperatura do forno sobe rapidamente até por volta de 100°C. Após isso, a temperatura é aumentada vagarosamente até 130°C e durante este tempo a madeira é seca à altas temperaturas até um teor de umidade próximo de zero;
- ✓ **Fase 2:** Tratamento térmico – após o término do processo de secagem, a temperatura no interior do forno é aumentada entre 185°C e 215°C. Após se atingir a temperatura desejada, esta fica constante por aproximadamente 2 a 3 horas dependendo do uso final da madeira;
- ✓ **Fase 3:** Resfriamento e condicionamento – o estágio final tem a função de baixar a temperatura usando sistemas de jatos de água até que se atinja uma temperatura entre 80 e 90°C. Então, a madeira tem a sua umidade regulada até teores entre 4 e 7% de umidade.



Fonte: (FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION, 2003)

3.4.8. Considerações sobre a revisão bibliográfica

O estudo dos painéis à base de madeira para aplicação em diferentes segmentos industriais vem ganhando espaço no âmbito tanto nacional quanto internacional. No entanto, quando o uso dos painéis se destina à construção civil alguns requisitos tornam-se necessários especialmente quanto desempenho físico-mecânico além da durabilidade dos painéis, pensando na vida útil da edificação.

Sendo assim, estudos que proporcionem maior durabilidade a madeira e painéis à base de madeira tornam-se necessários visando uma alternativa sustentável sem prejuízo as demais propriedades deste material. Portanto, o uso da termorretificação e do tratamento químico nos painéis à base de madeira tem crescido nas últimas décadas por mostrarem eficiência sem comprometimento do produto original.

A partir da revisão da literatura pôde-se definir temperaturas de termorretificação, métodos de tratamento químico, processo produtivo em laboratório e análises complementares que permitiram uma conclusão mais precisa e adequada dos resultados experimentais obtidos neste estudo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, estão descritos os materiais utilizados, os procedimentos de produção dos painéis de compensado, tratamento com CCA e termorretificação, bem como a metodologia dos testes realizados de massa específica aparente, teor de umidade, inchamento em espessura, absorção de água, flexão estática paralela e perpendicular às fibras, cisalhamento na linha de cola e molhabilidade.

As variáveis analisadas nesta pesquisa levaram em consideração o tipo e a forma de tratamento. Como tipo de tratamento foram realizados a termorretificação com três temperaturas, 160, 180 e 200°C e o tratamento químico em autoclave com CCA. Quanto à forma de tratamento, no primeiro caso foi analisado o tratamento das lâminas de madeira antes da produção dos painéis e, no segundo caso, o tratamento dos painéis sem tratamento prévio das lâminas, ou seja, foi realizado o tratamento depois da produção dos painéis. Também foram produzidos painéis sem tratamento como referência.

Foram escolhidas estas três temperaturas de termorretificação com base no exposto na revisão bibliográfica, na qual pode-se perceber que o processo de modificação térmica começa a partir de aproximadamente 140°C e que, acima de 220°C, começa a haver uma degradação mais acentuada da celulose, o que provocaria grandes perdas de resistência mecânica. Desta forma, foram escolhidas as temperaturas de 160°C, 180°C e 200°C, as quais também estão muito presentes nas literaturas consultadas.

No total foram analisados nove tratamentos diferentes, contando a referência. Para cada tratamento, foram produzidos quatro painéis com sete lâminas, resultando num total de 36 painéis produzidos. A produção dos painéis foi realizada da mesma forma para todos os tratamentos e está descrita a seguir.

4.1. Produção dos painéis

A produção dos painéis de compensado foi realizada no Laboratório de Painéis da UNESP/Câmpus de Itapeva. Os painéis foram produzidos com lâminas de *Pinus taeda* com 2,3 mm de espessura, doadas, já secas, pela empresa “Caribea Compensados” de São Manuel no estado de São Paulo. A madeira utilizada para a produção das lâminas foi cortada com 20 anos de idade e foi proveniente da região de Imbituva no estado do Paraná. Como as lâminas estavam em dimensões comerciais quando recebidas, inicialmente foram esquadrejadas nas dimensões de 450 x 450 mm, devido a limitação dimensional da prensa utilizada na produção. Este

esquadrejamento foi feito de tal forma a eliminar, o máximo possível de defeitos nas lâminas como nós, fendas e rachaduras.

As lâminas esquadrejadas foram classificadas visualmente segundo a ABNT NBR ISO 2426-3: 2007, com o intuito de selecionar as que apresentaram menor quantidade de defeitos. Desta forma, as lâminas sem defeito foram utilizadas na parte externa dos compensados e as que possuíam algum tipo defeito nas camadas mais internas do painel.

Após a classificação das lâminas, as mesmas foram secas em estufa laboratorial a $80 \pm 3^\circ\text{C}$ até se atingir teor de umidade de 3%. Então, foi realizada a preparação do adesivo, a ser aplicado na gramatura de 400 g/m^2 em linha de cola dupla, ou seja, houve a aplicação em somente uma superfície da lâmina. O adesivo foi preparado com a resina fenol-formaldeído da Momentive, farinha de trigo comum e água, nas proporções de 100:10:10, respectivamente. Como a gramatura utilizada foi de 400 g/m^2 e a dimensão da lâmina foi de $450 \times 450 \text{ mm}$, foram utilizados 81g de adesivo por linha de cola. A aplicação do adesivo foi realizada manualmente com uma espátula de silicone.

Conforme o adesivo foi sendo aplicado nas lâminas, as mesmas foram sendo sobrepostas com a direção da grã perpendicular às lâminas adjacentes, totalizando sete lâminas por painel (Figura 21A). Posteriormente, as sete lâminas sobrepostas foram levadas à pré-prensagem a frio, em uma prensa manual com pressão de 1 kgf/cm^2 durante 20 minutos (Figura 21B), para a transferência de adesivo para a lâmina em contato e, também, retirada de excesso de ar entre as lâminas, com a intenção de eliminar a formação de bolhas durante o processo de prensagem a quente.

Figura 21 – Processo de produção do compensado; (A) Sobreposição das sete lâminas; (B) Pré-prensagem a frio.



Fonte: Autor

Ao fim da pré-prensagem, o painel foi levado à prensagem a quente, pressão de 6 kgf/cm², temperatura de 180°C por 10 minutos, dividida em três ciclos de prensagem com 3 minutos cada e 30 segundos de alívio da pressão entre os ciclos, onde houve a cura do adesivo e a consolidação do painel. A prensagem foi realizada na prensa hidráulica Hidral-Mac 80 T. Após a prensagem, o painel foi acondicionado em ambiente climatizado 25°C e 60% de umidade relativa do ar por um período de 72 horas, e então, suas bordas foram esquadrejadas para o acabamento final do painel (Figura 22).

Figura 22 – Painel produzido com sete lâminas.



Fonte: Autor

Após produção e acabamento, foram retirados os corpos de prova para a realização dos testes físicos, mecânicos e molhabilidade, descritos posteriormente.

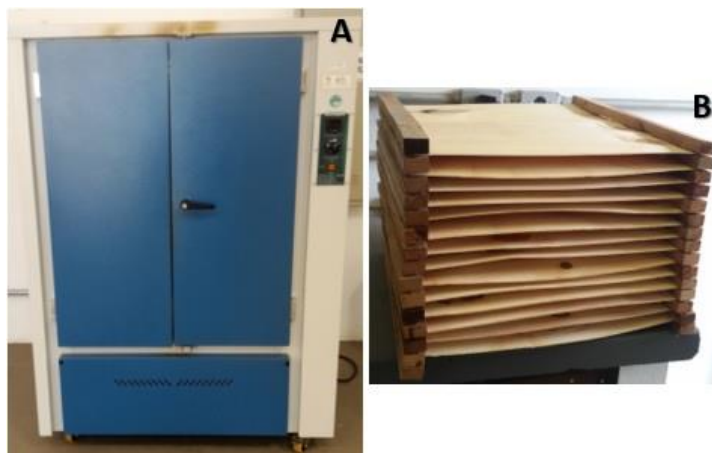
4.2. Tratamentos preservativos

Os tratamentos preservativos foram aplicados inicialmente nas lâminas para posterior produção do painel e, também, nos painéis produzidos, sem prévia aplicação nas lâminas. As metodologias que foram utilizadas no tratamento por termorretificação e com CCA estão apresentadas nos itens seguintes.

4.2.1. Termorretificação

A termorretificação das lâminas e dos painéis foi realizada em uma estufa laboratorial da marca Marconi, localizada no Laboratório de Preservação da Madeira da UNESP /Câmpus de Itapeva (Figura 23A).

Figura 23 – Processo de termorretificação; (A) Estufa laboratorial Marconi; (B) Empilhamento das lâminas com tabiques.

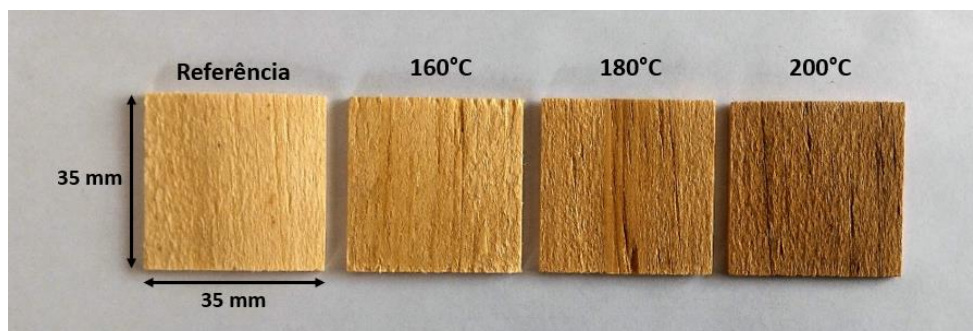


Fonte: Autor

Para a realização do tratamento, as lâminas e os painéis foram empilhados dentro da estufa com o auxílio de tabiques (Figura 23B), com o intuito de que todas as superfícies ficassem em contato direto com a temperatura. Após isso, iniciou-se o processo de aquecimento a uma taxa de $2,6^{\circ}\text{C}/\text{min}$, até atingir a temperatura do tratamento (160°C , 180°C e 200°C). Quando se atingiu a temperatura necessária, iniciou-se o processo de termorretificação durante uma hora para todas as temperaturas. A estufa então foi desligada, e as lâminas permaneceram em seu interior por mais 30 minutos até o resfriamento, e então foram acondicionadas em ambiente climatizado com 25°C e 60% de umidade relativa do ar. Posteriormente, as lâminas foram secas em estufa, até atingiram umidade de 3% para a produção dos painéis.

Foi determinado o rendimento da termorretificação através da determinação da porcentagem da perda de massa do material durante o processo. Para isso foram produzidos 10 corpos de prova para cada temperatura e para a referência com as dimensões de $35 \times 35 \times 2,3$ mm, ou seja, com a própria espessura da lâmina (Figura 24).

Figura 24 – Corpos de prova de porcentagem de perda de massa para cada temperatura e a referência.



Fonte: Autor

Os corpos de prova foram inicialmente secos completamente em estufa laboratorial, então foram determinadas suas massas secas em uma balança de precisão digital *Ohaus Adventurer* com precisão de 0,01g. Posteriormente, os corpos de prova passaram pelo processo de termorreificação como explicado anteriormente. Após o decorrido o tratamento, suas massas foram novamente determinadas e, através da equação (1), foi determinada a porcentagem de perda de massa.

$$R = \left(\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde: R é a redução da massa, em porcentagem; P_1 é a massa antes da termorreificação, em gramas; P_2 é a massa depois da termorreificação, em gramas.

4.2.2. Arseniato de Cobre Cromatado (CCA)

O tratamento químico com arseniato de cobre cromatado (CCA) foi realizado em autoclave da Montana Química S.A. com o método de célula cheia (Figura 25B), localizada no Laboratório de Preservação da Madeira da UNESP/Câmpus de Itapeva. O tratamento foi realizado tanto para as lâminas de madeira, quanto para painéis já produzidos.

O processo de célula cheia utilizado consistiu nas três etapas descritas abaixo:

- ✓ 1ª etapa – vácuo inicial de 560 mmHg durante 30 minutos com a intenção de retirar o ar presente nos poros da madeira para facilitar a penetração da solução de CCA. Nesta etapa ocorreu, transcorridos os 30 minutos, o enchimento do cilindro da autoclave.
- ✓ 2ª etapa – aplicação da pressão de 12 kgf/cm² por um período de 60 minutos, com o intuito de promover a penetração da solução na madeira.
- ✓ 3ª etapa – vácuo final após a retirada da solução do cilindro. Nesta etapa o material foi novamente submetido a um vácuo de 560 mmHg durante 15 minutos, para a retirada do excesso de solução da superfície da madeira.

Após o tratamento com CCA, os painéis e as lâminas foram secos ao ar livre até estabilização da umidade em aproximadamente 12%. Posteriormente, as lâminas foram secas em estufa, até atingiram umidade de 3% para a produção dos painéis.

O CCA utilizado foi do tipo C na forma de solução aquosa, com concentração de 1,6% e uma retenção média devido ao processo de 5 kg/m³.

Figura 25 – Tratamento com CCA; (A) Amarração das lâminas e painéis a serem inseridos na autoclave; (b) Autoclave de preservação de madeira utilizada.



Fonte: Autor

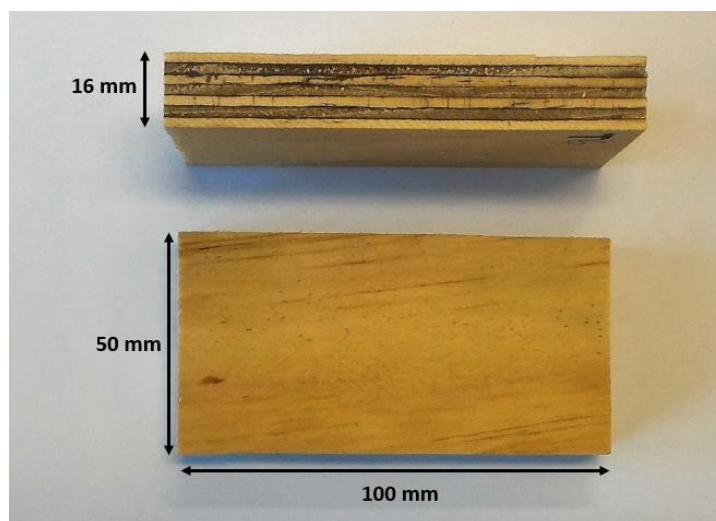
4.3. Ensaios físicos

Os mesmos testes físicos foram realizados para os painéis tratados com termorretificação e com CCA e foram: teor de umidade, massa específica e inchamento em espessura, os quais serão descritos detalhadamente a seguir.

4.3.1. Massa específica aparente

Os ensaios de massa específica aparente foram realizados com base na norma ABNT NBR 9485: 2011. Foram retirados dez corpos de prova dos painéis produzidos para cada tratamento, com dimensões de 100 x 50 x 16 mm (Figura 26).

Figura 26 – Corpo de prova de massa específica aparente.



Fonte: Autor

Primeiramente, foi determinada a massa dos corpos de prova em uma balança de precisão digital *Ohaus Adventurer* com precisão de 0,01g. Então, foram realizadas as medidas das dimensões dos corpos de prova, sendo duas medidas do comprimento, duas da largura, quatro da espessura e, então, foram encontradas as médias aritméticas de cada dimensão. As medições da largura e comprimento foram realizadas com um paquímetro digital *Digimess* com precisão de 0,01 mm e as medições da espessura foram realizadas com um micrômetro digital *Digimess* com precisão de 0,001 mm. Com os dados coletados foi calculada a massa específica aparente através da equação (2).

$$\rho = \frac{m}{c \times l \times e} \quad (2)$$

Onde: ρ é a massa específica aparente, em g/cm³; m é a massa do corpo de prova, em gramas; c é o comprimento do corpo de prova, em centímetros; l é a largura do corpo de prova, em centímetros; e é a espessura do corpo de prova, em centímetros.

4.3.2. Teor de umidade

Os ensaios para determinação do teor de umidade foram realizados de acordo com a norma da ABNT NBR 9484 (2011), com a exigência de que as massas secas dos corpos de prova fossem de no mínimo 10g, portanto, utilizou-se os corpos de prova com as mesmas dimensões dos de massa específica aparente (Figura 26), num total de 10 corpos de prova por

condição. Primeiramente, todos os corpos de prova foram pesados numa balança de precisão digital *Ohaus Adventurer* com precisão de 0,01g, e então levados à estufa laboratorial da Marconi com temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$, permanecendo até atingirem massa constante, sendo então esta massa anotada. Com os dados de massa coletados, foram calculados os teores de umidade através da equação (3).

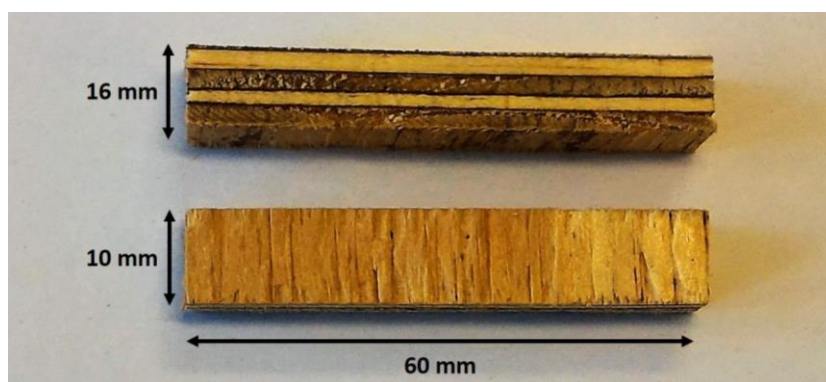
$$TU = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad (3)$$

Onde: TU é o teor de umidade, em porcentagem; mu é a massa úmida (inicial) do corpo de prova, em gramas; ms é a massa seca (final) do corpo de prova, em gramas.

4.3.3. Inchamento em espessura

Os ensaios de inchamento foram realizados com base na norma da ABNT NBR 9535: 2011. Primeiramente, foram confeccionados seis corpos de prova por condição, com dimensões nominais de 60x10x16mm, sendo que o comprimento (60 mm) foi posicionado no sentido perpendicular à direção das fibras da lâmina externa, conforme especificação da norma utilizada (Figura 27). Após a confecção os corpos de prova foram lixados, para a retirada dos defeitos de corte.

Figura 27 – Corpo de prova de inchamento em espessura.



Fonte: Autor

Foram separados em duas séries de três, sendo uma série de controle conforme especificação normativa. Então, foi realizada a medição da espessura da região central (medições realizadas sempre com o auxílio de um paquímetro digital *Digimess* com precisão

de 0,01 mm) de cada corpo de prova. As amostras de controle foram secas em estufa por 24 horas à temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ e, novamente, tiveram a medida da espessura retirada. Os outros três corpos de prova foram submetidos à imersão em água por 24 horas e, em seguida, foram medidas suas espessuras e, posteriormente, secos em estufa a temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas e, novamente, foram medidas suas espessuras conforme procedimento normativo.

Com os dados obtidos, foi calculada a recuperação em espessura, o inchamento mais recuperação em espessura e, por fim, o inchamento, através das equações (4), (5) e (6), respectivamente.

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

Onde: R é a recuperação em espessura, em porcentagem; e_1 é a soma das espessuras iniciais dos corpos de prova utilizados como controle, em milímetros; e_2 é a soma das espessuras dos corpos de prova utilizados como controle e secos em estufa, em milímetros; e_3 é a soma das espessuras iniciais dos corpos de prova antes da imersão em água, em milímetros; e_5 é a soma das espessuras dos corpos de prova após a imersão em água, em milímetros;

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

Onde: IR é o inchamento mais recuperação da espessura, em porcentagem; e_4 é a soma das espessuras dos corpos de prova, após a imersão em água, e posteriormente submetidos à secagem em estufa, em milímetros.

$$I = IR - R \quad (6)$$

Onde: I é o inchamento em espessura do corpo de prova, em milímetros.

Este procedimento foi realizado cinco vezes, por condição, com o intuito de obter repetições suficientes que pudessem representar os dados.

4.4. Ensaaios mecânicos

Os mesmos testes mecânicos foram realizados para os painéis tratados com termorretificação e com CCA e foram: resistência à flexão estática paralela e perpendicular, para a determinação do Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR) e cisalhamento na linha de cola, para a determinação da qualidade da colagem. Os testes estão descritos detalhadamente a seguir.

4.4.1. Flexão estática

Os ensaios de flexão estática foram realizados de acordo com a norma da ABNT NBR 9533: 2012. Primeiramente, foram confeccionados quatro corpos de prova por condição, tanto para flexão paralela quanto para a flexão perpendicular, os quais possuíam a direção das fibras das lâminas externas paralelas ao seu comprimento, na flexão paralela; e a direção das fibras das lâminas externas perpendiculares ao seu comprimento, na flexão perpendicular.

As dimensões dos corpos de prova foram de 75 mm de largura e 16 mm de espessura, devido a espessura do painel produzido. O comprimento do corpo de prova foi determinado através da equação (7), de acordo com a especificação da norma referida.

$$c = 25 \times e + 50 \quad (7)$$

Onde: c é o comprimento do corpo de prova, em milímetros; e é a espessura do corpo de prova, em milímetros.

Sendo a espessura do corpo de prova 16 mm, tem-se, portanto, através da equação 7 o comprimento de 450 mm. Desta forma, as dimensões do corpo de prova de flexão foram 450 x 75 x 16 mm (Figura 28).

Figura 28 – Corpo de prova de flexão estática.



Fonte: Autor

Foram realizadas as medidas da espessura e da largura de todos os corpos de prova com o auxílio de um paquímetro digital *Digimess* com precisão de 0,01mm e, também, foi realizada a marcação em cada amostra do local onde se posicionaria o cutelo de carregamento.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC, do Laboratório de Propriedade dos Materiais – UNESP/Itapeva. Os corpos de prova foram arranjados de acordo com as especificações da norma ABNT NBR 9355: 2012, que exige que o cutelo de carregamento e os apoios sejam do mesmo comprimento e diâmetro, que o vão seja de 25 vezes a espessura, sendo neste caso de 400 mm, já que a espessura é de 16 mm e que o corpo de prova deve estar perfeitamente centralizado, com 25 mm de seu comprimento além dos apoios dos dois lados (Figura 29).

Houve apenas um ciclo de carga na realização do ensaio, como sugerido pela norma referida e a velocidade de carregamento foi de 0,08 mm/s, calculada através da recomendação da norma.

Figura 29 – Ensaio de flexão estática realizado na máquina universal de ensaios EMIC.



Fonte: Autor

As equações (8) e (9) apresentam o cálculo do MOE e do MOR, respectivamente.

$$MOE = \frac{L^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times l \times e^3 \times (S_2 - S_1)} \quad (8)$$

Onde: MOE é o módulo de elasticidade, em MPa; L é a distância entre centros de apoio, o vão, em milímetros; l é a largura do corpo de prova, em milímetros; e é a espessura do corpo de prova, em milímetros; $F_2 - F_1$ é o incremento de carga no trecho reto da curva carga-deformação, em N, com a porcentagem de F_2 com relação a carga de ruptura de 40%; $S_2 - S_1$ é o incremento de deflexão, no ponto central do vão, correspondente a $F_2 - F_1$, em milímetros.

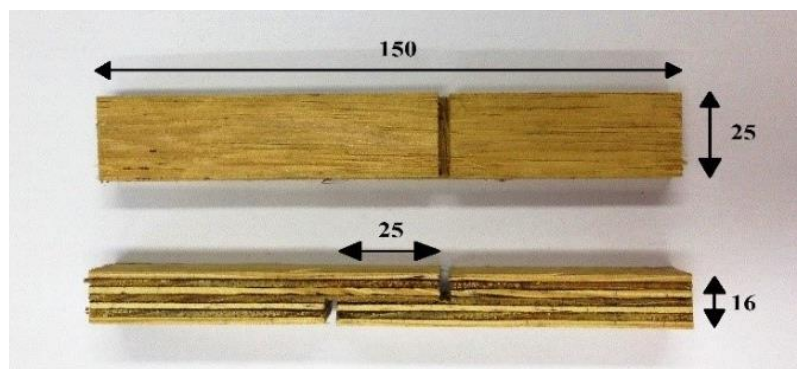
$$MOR = \frac{3 \times F_{m\acute{a}x} \times L}{2 \times l \times e^2} \quad (9)$$

Onde: MOR é a tensão de ruptura a flexão estática, em MPa; $F_{m\acute{a}x}$ é a carga de ruptura, em N;

4.4.2. Cisalhamento na linha de cola

O ensaio de cisalhamento na linha de cola foi realizado de acordo com a norma da ABNT NBR ISO 12466-1: 2012. Primeiramente, foram confeccionados os corpos de prova com dimensões de 150 x 25 x 16 mm, onde foram realizados dois sulcos distantes um do outro por 25mm. Foram confeccionados seis corpos de prova por tratamento de acordo com a Figura 30. As lâminas externas e central devem possuir a direção das fibras paralela ao comprimento dos corpos de prova.

Figura 30 – Corpo de prova de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: Autor

Primeiramente, foram retiradas as medidas da região entre os sulcos, comprimento e largura, com o auxílio de um paquímetro digital *Digimess* com precisão de 0,01 mm. Logo após, os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios EMIC do Laboratório de Propriedade dos Materiais – UNESP/Câmpus de Itapeva (Figura 31). A velocidade de carregamento utilizada foi de 120 N/s, proporcionando um tempo de ensaio de em média 35 segundos, dentro do exigido pela norma que é de 30 ± 10 s.

Figura 31 – Ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Fonte: Autor

Com a força de cisalhamento determinada pela máquina, foi calculada a tensão de cisalhamento através da equação (10).

$$\sigma_{cis} = \frac{F_{rup}}{A} \quad (10)$$

Onde: σ_{cis} é a tensão de cisalhamento, em MPa; F_{rup} é a força no momento da ruptura do corpo de prova, em N; A é a área de cisalhamento localizada entre os sulcos, em mm².

4.5. Teste de molhabilidade das lâminas

Para o teste de molhabilidade das lâminas foi realizada a medição do ângulo de gota sobre a superfície das lâminas. Para a realização deste teste, foi utilizado um goniômetro digital da *Ramé-Hart instruments co.* (Figura 32), e como líquido para a formação da gota utilizou-se a água deionizada. O teste foi realizado no Laboratório de Plasmas Tecnológicos (LaPTec) da UNESP/Câmpus de Sorocaba.

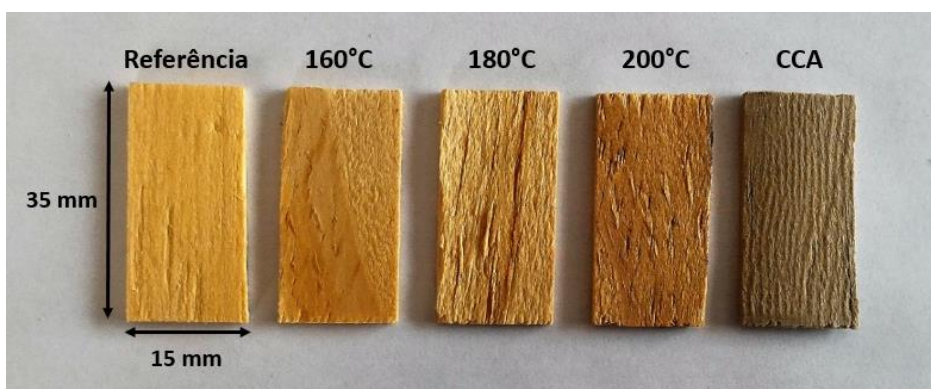
Figura 32 – Goniômetro digital *Ramé-Hart instruments co.*



Fonte: Autor

As amostras utilizadas possuíam dimensões de 15 x 35 mm com espessura de 2,3 mm, ou seja, a própria espessura da lâmina (Figura 33). Para cada tratamento, foram produzidas três gotas na superfície e, após 10 segundos de acomodação, foi realizada a medição do ângulo; cada medição resultou em 10 valores. Esta medição foi realizada com a utilização do *software DROPimage Standard* que acompanha o equipamento.

Figura 33 – Corpos de prova de molhabilidade



Fonte: Autor

4.6. Análise do teor de extrativos totais

Esta análise química foi realizada para as lâminas termorretificadas e a referência com o intuito de verificar a mudança na quantidade de teor de extrativos ocorrida na termorretificação, já que os extrativos influenciam diretamente na qualidade de colagem, pois interagem com o adesivo. Desta forma, foram produzidas amostras para as três temperaturas de termorretificação e para a lâmina sem tratamento, baseado no padrão TAPPI T257 cm-85.

O procedimento de produção das amostras consistiu inicialmente na moagem das lâminas termorretificadas em um moinho de facas tipo Wiley e, posterior classificação em peneira vibratória, onde foram selecionadas as partículas que passaram pela peneira de 32 mesh e foram retidas na peneira de 60 mesh.

Posteriormente, obteve-se o valor do absolutamente seco (a.s.). Para isso, pesou-se aproximadamente 1 g de partículas (amostra úmida) em um cadinho de alumínio, previamente pesado, com o auxílio de uma balança analítica Shimadzu, modelo AW 220, com precisão de 0,0001g. Posteriormente, o cadinho foi levado à estufa à 103 ± 2 °C, onde permaneceu por 24 horas. Depois de transcorrido este tempo, foi retirado da estufa e levado ao dessecador até esfriar, sendo então novamente pesado. Desta forma, obteve-se o peso da amostra seca.

Com a massa da amostra seca e da amostra úmida, pôde-se determinar o valor absolutamente seco das partículas através da equação (11).

$$a. s. = \frac{m_u - m_s}{m_u} \times 100 \quad (11)$$

Onde: *a. s.* é valor absolutamente seco das partículas, em porcentagem; m_u é a massa úmida da amostra, em gramas; m_s é a massa seca da amostra, em gramas.

Para a determinação dos extrativos totais, foram produzidas três amostras para a referência e para as três temperaturas de termorretificação. Para isso pesou-se aproximadamente 3 gramas a.s., ou seja, 3 gramas de partículas livre de umidade com base na porcentagem de a.s., em um sachê de papel filtro (Figura 34), para cada amostra. O teste foi realizado baseado no padrão TAPPI T204 cm-97.

Figura 34 – Sachê de papel filtro utilizado para a realização da determinação do teor de extrativos totais.



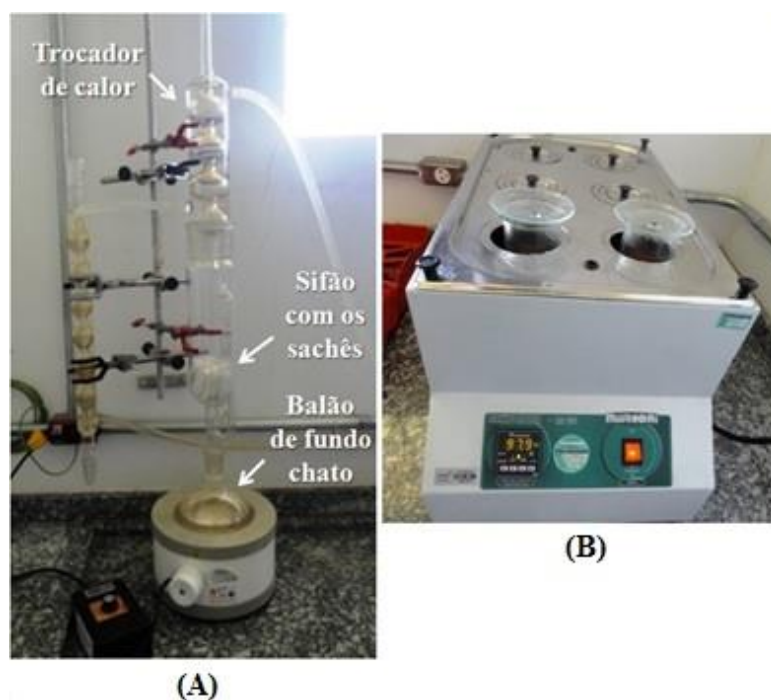
Fonte: Autor

O processo de determinação dos extrativos totais consistiu basicamente de três etapas, a primeira foi a extração com etanol-tolueno, a segunda a extração com etanol e a terceira a extração com água quente em banho-maria.

Na primeira etapa os sachês foram alojados no sifão do tubo de extração Soxhlet (Figura 35A), de forma que não atingisse a extremidade superior do mesmo. Então, iniciou-se o processo de extração, por 5 horas, com a utilização de 850 mL de uma solução de etanol-tolueno na concentração 1:2, a qual foi introduzida no balão de fundo chato localizado na extremidade inferior do tubo de extração. Este processo consiste na ebulição da solução, que sobe até o trocador de calor localizado sobre o sifão, onde é condensado, e cai sobre os sachês. Após atingir certo limite do sifão o líquido desce para o balão de fundo chato, onde é novamente transformado em vapor. Este processo ocorreu diversas vezes durante as 5 horas de extração. Desta forma os extrativos foram retirados das amostras e se alojaram no balão. O mesmo processo foi realizado na segunda etapa com uma solução de 850 mL de etanol, por mais 4 horas.

Posteriormente, foi realizada a última etapa da extração. Para isso, cada sachê foi aberto e seu conteúdo retirado com o auxílio de uma piseta e depositado em um béquer com 150 mL de água destilada. Então, os béqueres foram levados ao banho-maria, à temperatura de 98°C, por uma hora, como apresentado na Figura 35B.

Figura 35 – Processo de extração; (A) Extração com etanol-tolueno e etanol; (B) Extração com banho-maria.



Após o processo de extração, o conteúdo de cada béquer foi levado à filtração, no qual se utilizou um sistema de filtração por bomba a vácuo (Figura 36). Neste sistema, o conteúdo do béquer foi sendo despejado em um cadinho filtrante, com a massa previamente determinada, ligado ao kitassato, que por sua vez estava ligado à bomba de vácuo. Foram utilizados 500 mL de água destilada para lavar a amostra durante a filtração. Este processo foi realizado com cada béquer, obtendo-se no total, três cadinhos filtrantes para a amostra de controle, três para a temperatura de 160°C, três para a temperatura de 180°C e três para a temperatura de 200°C, os quais foram levados à estufa por 24 horas, e após isso, foram novamente pesados. Das massas obtidas foram subtraídas as massas dos cadinhos, encontrando-se, portanto, a massa livre de extrativos.

Figura 36 – Sistema de filtração a vácuo.



Fonte: Autor

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 equação (12). Com o cálculo da média aritmética e do desvio padrão, obteve-se o teor de extrativos totais.

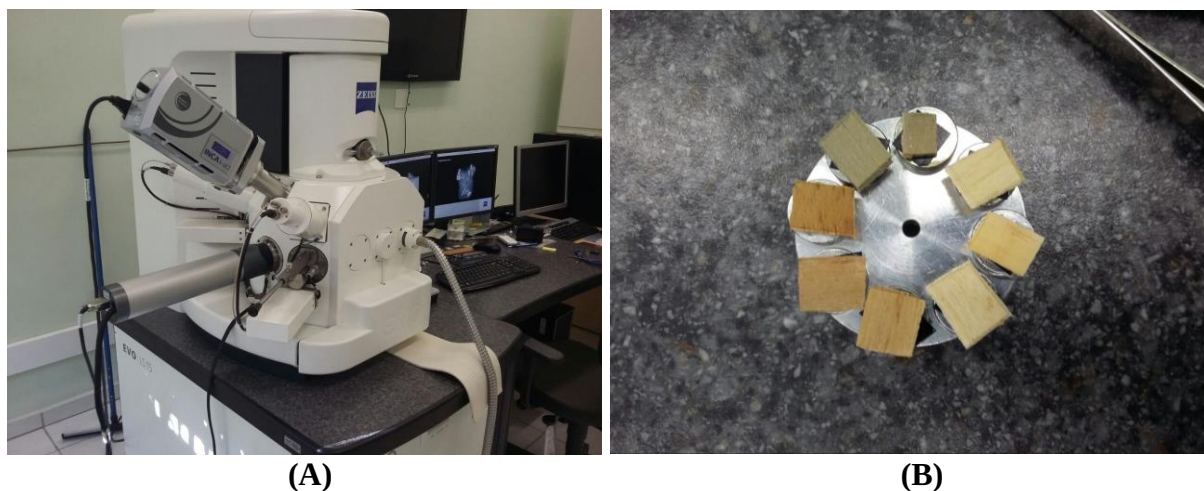
$$TET = \frac{m_{inicial} - m_{LE}}{m_{inicial}} \times 100 \quad (12)$$

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

4.7. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

Para a análise da integridade da superfície após os tratamentos foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura ZEISS, modelo EVO LS 15 (Figura 37A) localizado no Laboratório de Imagem dos Materiais – LaIMat da UNESP – Câmpus de Guaratinguetá. Foi utilizado o modo V_p de pressão variável, coletando-se o sinal pelo detector de elétrons retro espalhados (BSE), o que proporciona um melhor contraste. Foi utilizada atmosfera de nitrogênio para neutralizar a superfície. Foram coletadas imagens dos corpos de prova para todos os tratamentos, com dimensões de 10 x 10 mm, para a referência, para as três temperaturas de termorretificação e para o CCA (Figura 37B).

Figura 37 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



Fonte: Autor

Foi detectado, também, pela técnica de EDS a dispersão dos elementos químicos cobre, cromo e arsênio na superfície da lâmina tratada com CCA. Este dispositivo é um acessório do microscópio eletrônico de varredura

4.8. Análise estatística

Foi realizado um delineamento fatorial inteiramente casualizado com dois fatores (efeitos principais), sendo um correspondente aos tratamentos preservativos e outro correspondente a forma como esses tratamentos foram realizados. O fator correspondente aos tratamentos preservativos possuiu quatro níveis, sendo eles: termorretificação a 160°C (T160),

termorretificação a 180°C (T180), termorretificação a 200°C (T200) e tratamento químico com CCA (TCCA). O fator correspondente à forma do tratamento possuiu dois níveis, sendo eles: tratamento da lâmina e tratamento do painel. Sendo assim, foi realizado um arranjo fatorial de 4 x 2, além de um painel de referência, no qual não foi realizado nenhum tratamento.

Foi realizada a Análise de Variância com nível de significância (α) de 5% para testar a existência de diferenças significativas entre as médias dos efeitos principais e a interação entre os fatores. Nos casos em que houve diferenças significativas, foi necessário realizar o Teste de Tukey, também com $\alpha = 5\%$, com o intuito de identificar estas diferenças. Para tal foram verificadas inicialmente as condicionantes da análise de variância que são a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias, através dos testes de Shapiro Wilk e Bartlett, respectivamente. Foi também apresentado o gráfico das interações, que se faz necessário, principalmente, quanto à interação entre os fatores se faz significativa. Todas as análises descritas foram realizadas no *software* R, versão 3.3.1 de 2016.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos quanto à perda de massa da termorretificação e, nos testes químicos, de molhabilidade, microscopia eletrônica e físico-mecânicos realizados tanto para o tratamento com termorretificação quanto para o tratamento com CCA, bem como a comparação com os valores exigidos em norma e com a literatura.

5.1. Porcentagem de perda de massa na termorretificação (PM)

A termorretificação promove uma degradação controlada da madeira. Isso pode ser evidenciado pela perda de massa da madeira conforme o tempo e a temperatura de termorretificação. A Tabela 2 apresenta os valores médios obtidos de perda de massa para cada temperatura.

Tabela 2 – Valores médios de perda de massa (PM) na termorretificação.

	160°C	180°C	200°C
Porcentagem de perda de massa (%)	0,75a (0,11) ¹	1,21b (0,13)	2,15c (0,13)

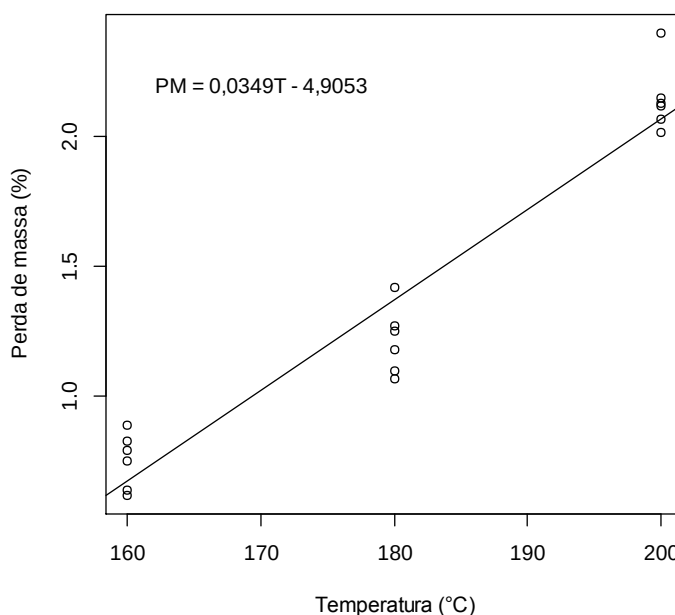
¹ Valores entre parênteses representam o desvio padrão.

Fonte: Autor

A análise de variância mostrou que houve diferença significativa entre as médias à um nível de significância de 5% ($F_{\text{value}} = 208,6$; $p\text{-value} = 1,347 \times 10^{-10} < 5\%$). A Figura 38 apresenta o gráfico da reta ajustada da regressão linear. O modelo apresentou coeficiente de determinação $R^2 = 0,92$, mostrando uma boa representação dos dados.

Pode-se perceber pelos resultados obtidos que com o aumento da temperatura houve aumento na perda de massa, o que evidencia que houve perda de material, resultante de reações químicas decorrentes da termorretificação, como degradação dos extrativos e dos carboidratos da madeira.

Figura 38 – Gráfico da regressão linear da perda de massa em função da temperatura de termorretificação



Fonte: Autor

5.2. Análise do teor de extrativos totais na termorretificação

A Tabela 3 apresenta o teor de extrativos médio para as lâminas termorretificadas nas três temperaturas estudadas.

Tabela 3 – Resultados médios do teor de extrativos.

	Referência	T160	T180	T200
Teor de Extrativos totais (%)	3,63a ¹ (0,04) ²	2,97b (0,06)	4,19c (0,04)	4,83d (0,02)

¹ Médias seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferença significativa (Tukey, $\alpha = 5\%$).

² Valores entre parênteses representam o desvio padrão.

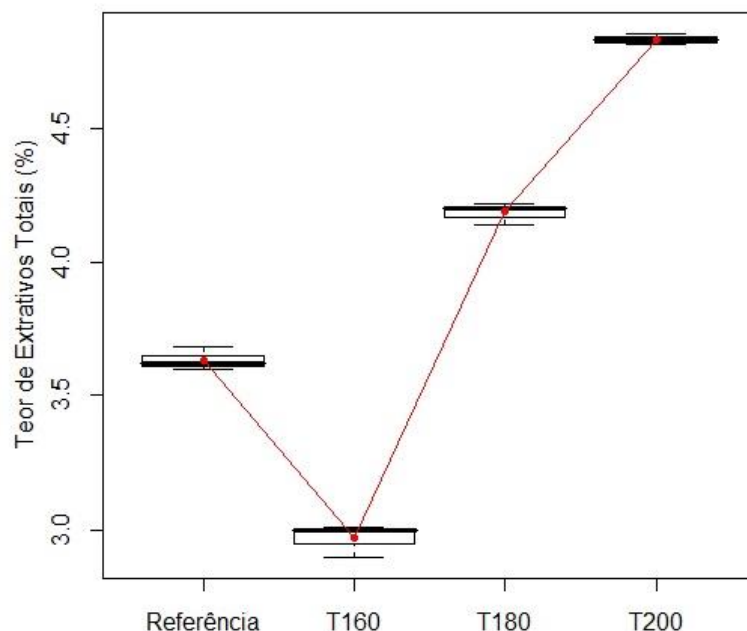
Fonte: autor

A Figura 39 apresenta o gráfico com a distribuição dos dados de teor de extrativos totais para melhor visualização dos resultados obtidos. Os pontos vermelhos indicam a média em cada caso.

Kačíková et al. (2013) perceberam em seu estudo que até a temperatura de termorretificação de 158°C o grau de polimerização da celulose permaneceu praticamente inalterado, começando a ter uma diminuição relativamente pequena a partir desta temperatura, e tendo diminuição significativa apenas a partir de 220°C. Para a hemicelulose, no mesmo

estudo, houve uma degradação muito elevada em temperaturas próximas a 190°C e essa degradação gerou substâncias de menor peso molecular na madeira.

Figura 39 – Distribuição dos dados do teor de extrativos totais.



Fonte: Autor

O presente estudo seguiu essa mesma tendência, pois para a temperatura de 160°C houve uma redução de 0,66% no teor de extrativos em relação à referência, próxima a perda de massa, que foi de 0,75% (Tabela 2). Isso ocorreu, pois nessa temperatura não há muita degradação dos componentes estruturais da madeira (celulose, hemicelulose e lignina), havendo em grande parte apenas volatilização dos extrativos.

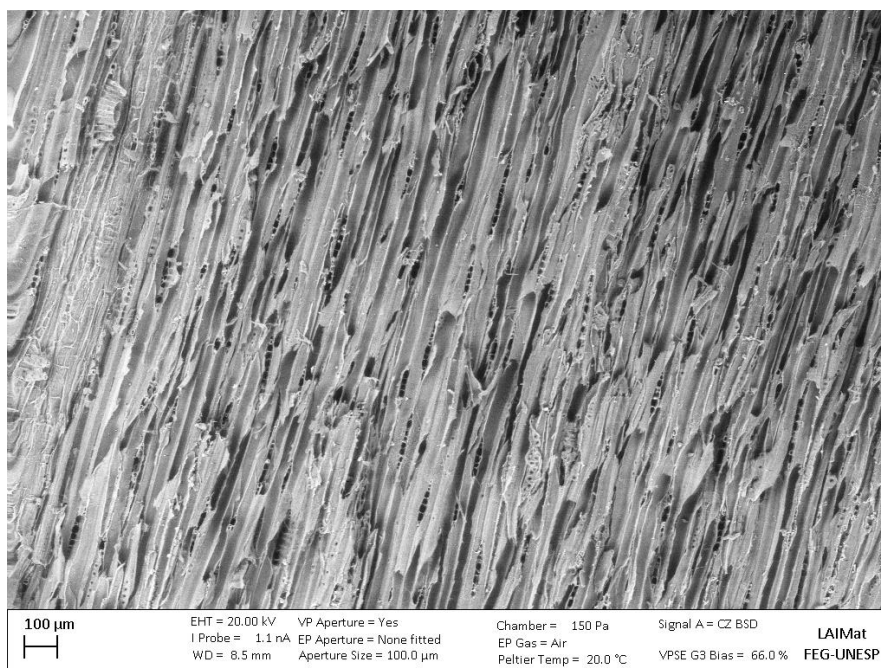
Já para as temperaturas de 180°C e 200°C houve um aumento no teor de extrativos (Tabela 3 e Figura 39). Estas temperaturas estão próximas à 190°C, a qual foi relatada por Kačíková et al. (2013), como sendo a temperatura na qual há grande degradação de hemiceluloses. Essa degradação das hemiceluloses gerou substâncias de menor peso molecular na madeira, as quais foram detectadas na análise de teor de extrativos totais. Essa geração foi ainda maior para a temperatura de 200°C, devido à maior degradação das hemiceluloses nessa temperatura.

Desta forma, o aumento deste teor de extrativos totais em 180°C e 200°C foi devido, principalmente, à degradação das hemiceluloses, com a formação de substâncias de baixo peso molecular, sem haver grande degradação de celulose, que ocorre a partir de 220°C.

5.3. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

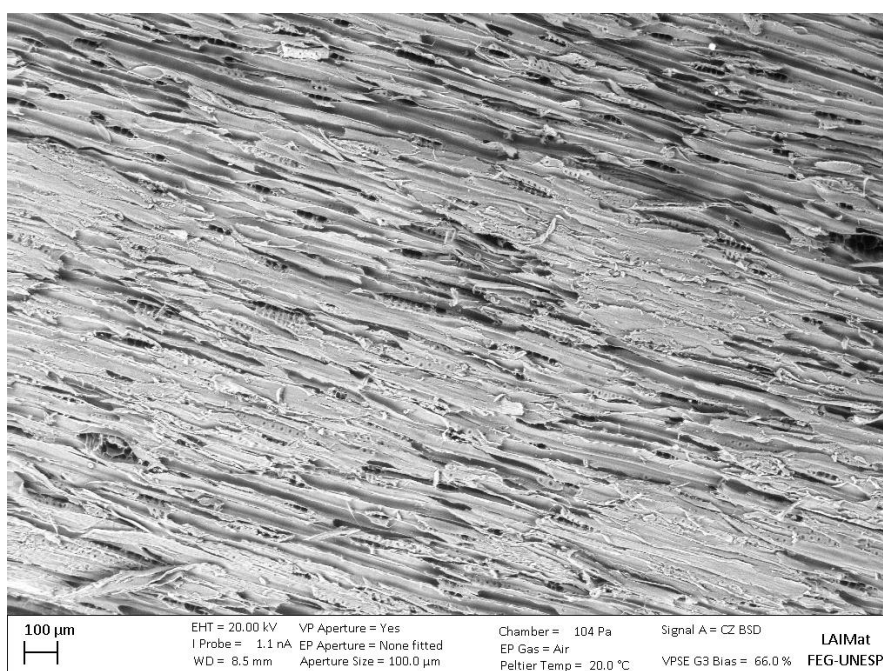
Nas Figuras 40 a 44 são apresentadas as imagens para análise da integridade da superfície obtidas no microscópio eletrônico de varredura com um aumento de 100 vezes.

Figura 40 – MEV para a lâmina de referência.



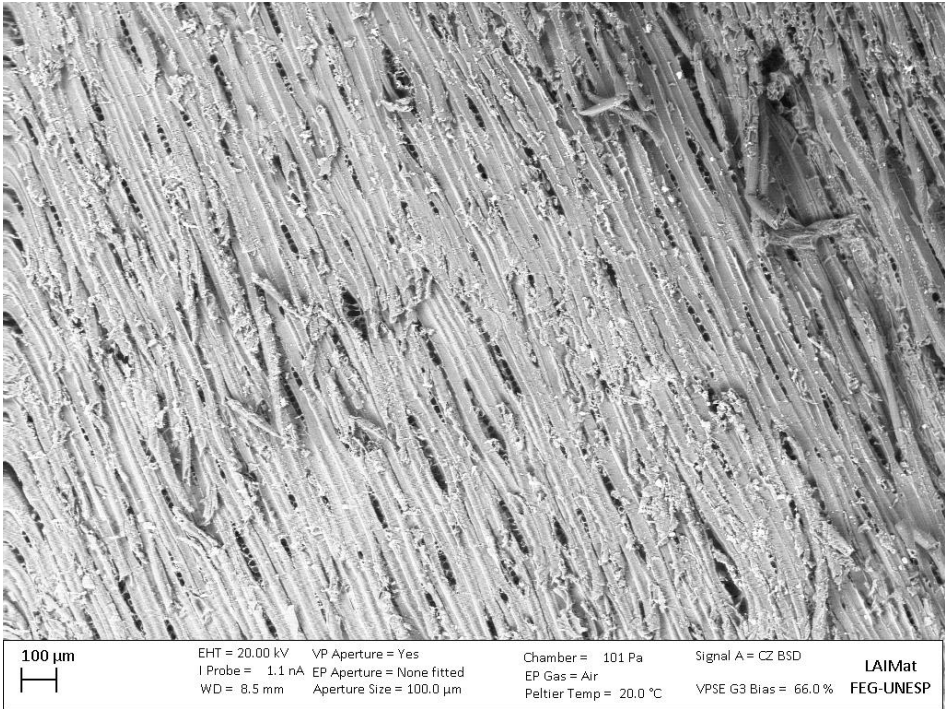
Fonte: Autor

Figura 41 – MEV para a lâmina termorretificada a 160°C.



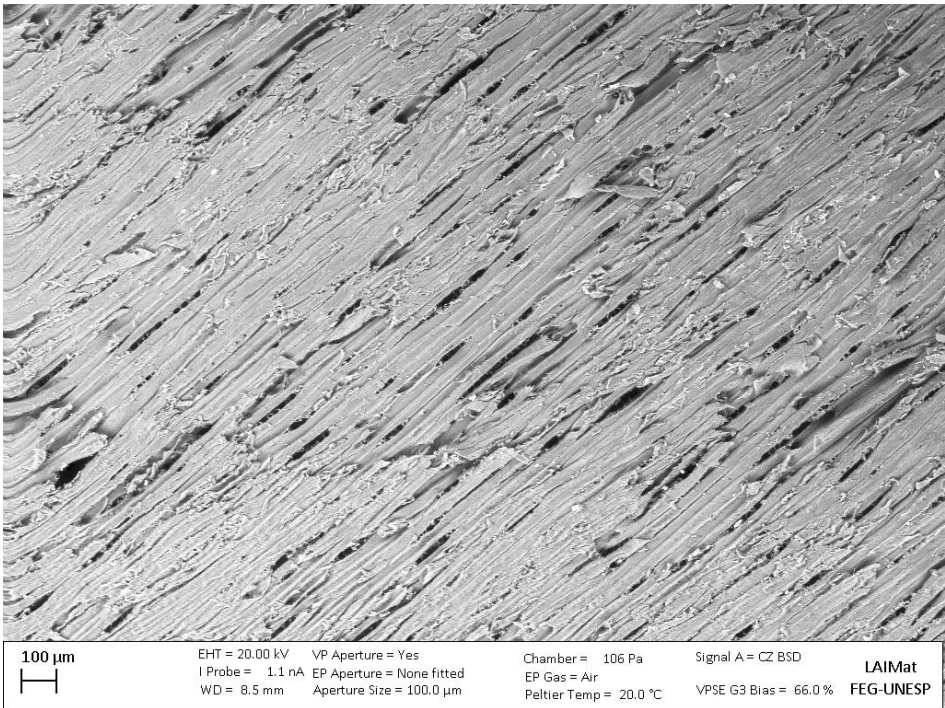
Fonte: Autor

Figura 42 – MEV para a lâmina termorretificada a 180°C.



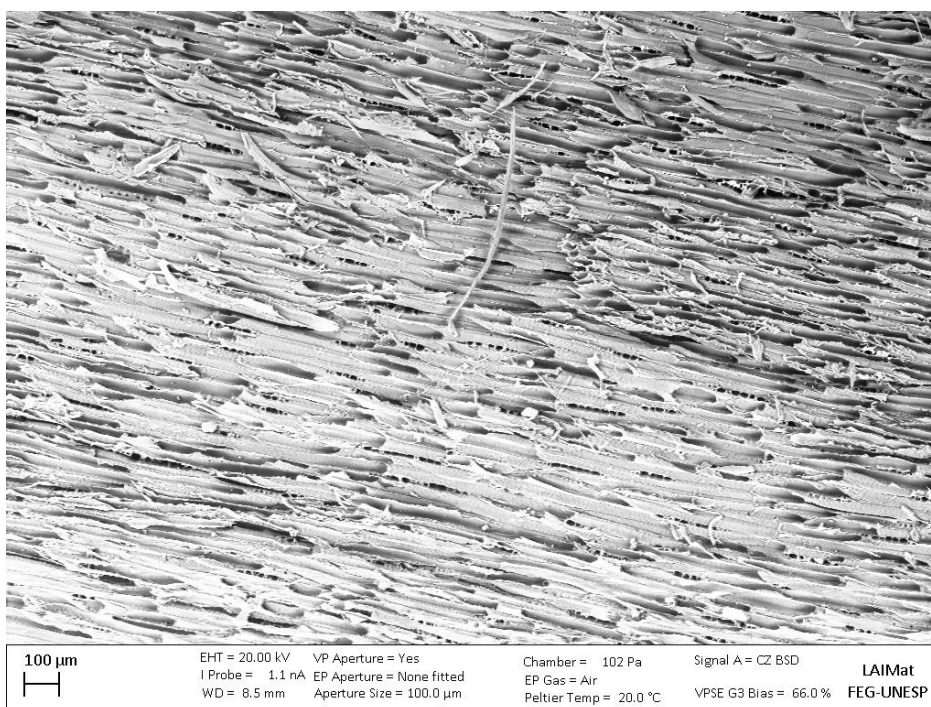
Fonte: Autor

Figura 43 – MEV para a lâmina termorretificada a 200°C.



Fonte: Autor

Figura 44 – MEV para a lâmina tratada com CCA.



Fonte: Autor

Pode-se perceber visualmente pelas Figuras 40 a 43 que o tratamento de termorreificação deixa a superfície menos rugosa, através da degradação das fibras da superfície. Isso ocorre conforme se aumenta a temperatura de termorreificação, já que na temperatura de 200°C (Figura 43), a superfície está bem menos rugosa que na referência (Figura 40).

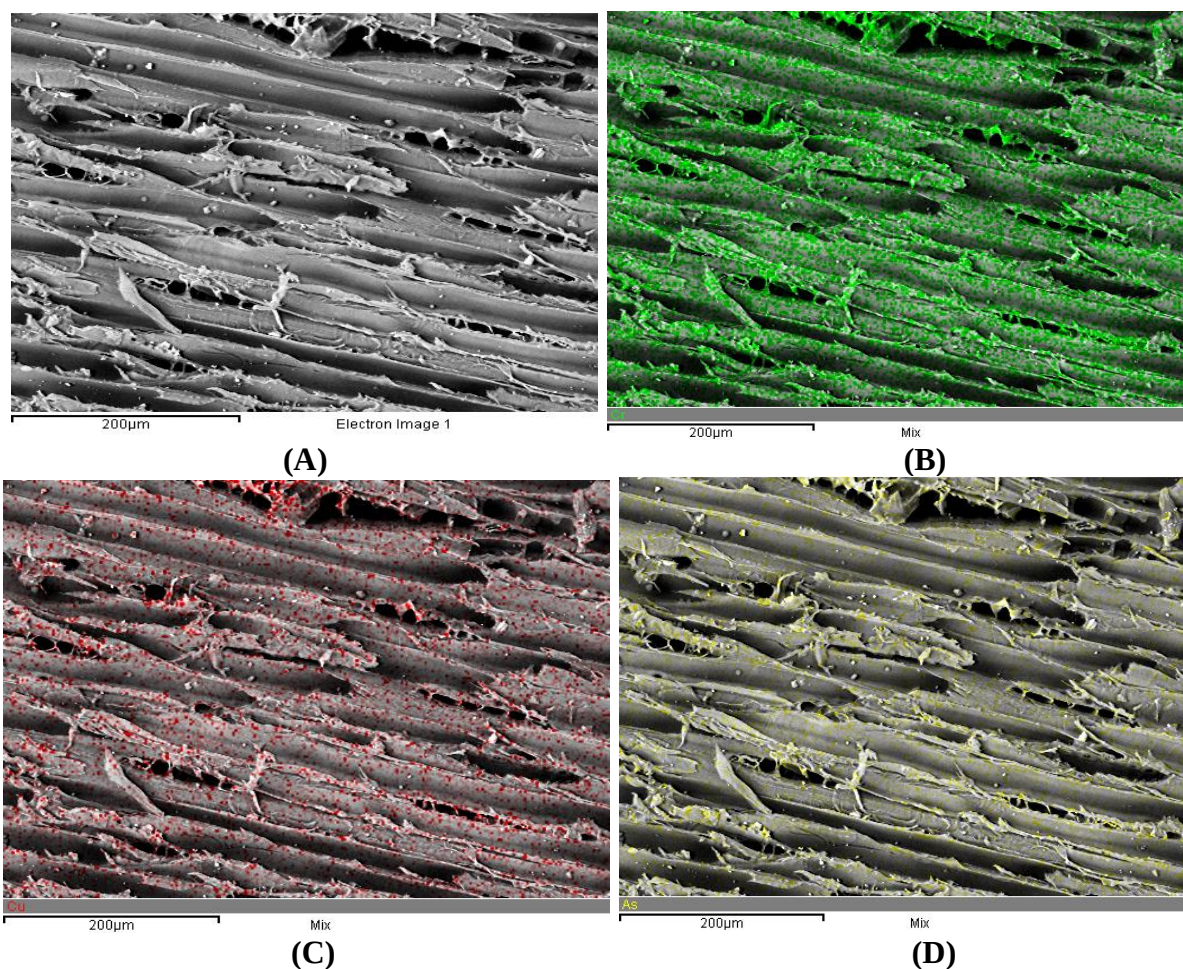
Salca e Hizioglu (2014) mostraram em seu estudo com quatro diferentes espécies de madeira que a termorreificação melhora a qualidade superficial da madeira, diminuindo a sua rugosidade e, conseqüentemente, tornando a superfície mais lisa. Entretanto, diminui a resistência superficial devido a degradação da parede celular. Unsal e Ayrilmis (2005), Kamdem, Pizzi e Jermannaud (2002) e Gündüz, Korkut e Korkut (2008) também notaram diminuição na rugosidade superficial com a termorreificação ao analisarem madeiras de espécies diferentes.

Percebeu-se, então que a termorreificação realmente diminuiu a rugosidade superficial da madeira. Dependendo da utilização, essa característica pode ser boa ou ruim, quando se deseja melhorar a qualidade superficial para dar melhor acabamento à superfície da madeira isso seria uma vantagem. Entretanto, para utilizações onde a madeira será colada, isso é uma desvantagem, pois uma superfície mais rugosa tem mais aderência com o adesivo, facilitando a formação de “ganchos” na colagem.

Já o tratamento com CCA (Figura 44) não alterou visualmente a qualidade da superfície em comparação com a amostra de referência (Figura 40), indicando que este tratamento não modifica a rugosidade da superfície.

Para um melhor entendimento da dispersão dos sais de CCA na superfície da lâmina tratada foi realizado o teste EDS com um aumento de 200 vezes, apresentado na Figura 45. Como pode ser visto, há uma maior distribuição do cromo na superfície, e uma menor distribuição do cobre e arsênio, respectivamente, evidenciando que a maior absorção pela parede é a do arsênio e, em segundo lugar do cobre. O cromo atua como fixador do cobre e do arsênio, que por sua vez penetram na parede e atuam como fungicida e inseticida, respectivamente.

Figura 45 – Distribuição dos sais de CCA na lâmina tratada; (A) Imagem com aumento de 200 vezes; (B) Disposição do cromo – verde; (C) Disposição do cobre – vermelho; (D) Disposição do arsênio – amarelo.



Fonte: Autor

5.4. Molhabilidade da lâmina de madeira tratada

Para o teste de molhabilidade, as médias dos resultados encontrados, juntamente com desvio padrão estão apresentados na Tabela 4. A Figura 46 apresenta o gráfico com a distribuição dos dados para melhor visualização dos resultados.

Tabela 4 – Valores médios encontrados para o ângulo de gota.

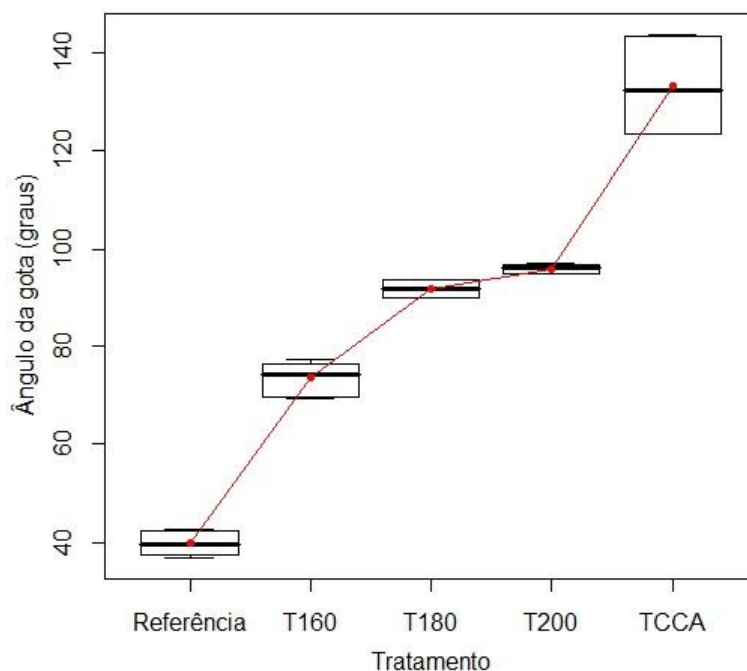
	Referência	T160	T180	T200	TCCA
Ângulo da gota (graus)	39,88a ¹ (2,18) ²	73,48b (3,10)	91,92c (1,83)	96,08d (0,83)	133,12e (8,32)

¹ Valores entre parênteses representam o desvio padrão.

² Médias seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferença significativa (Tukey, $\alpha = 5\%$).

Fonte: Autor

Figura 46 – Gráfico da distribuição dos dados referentes ao ângulo de gota.



Fonte: Autor.

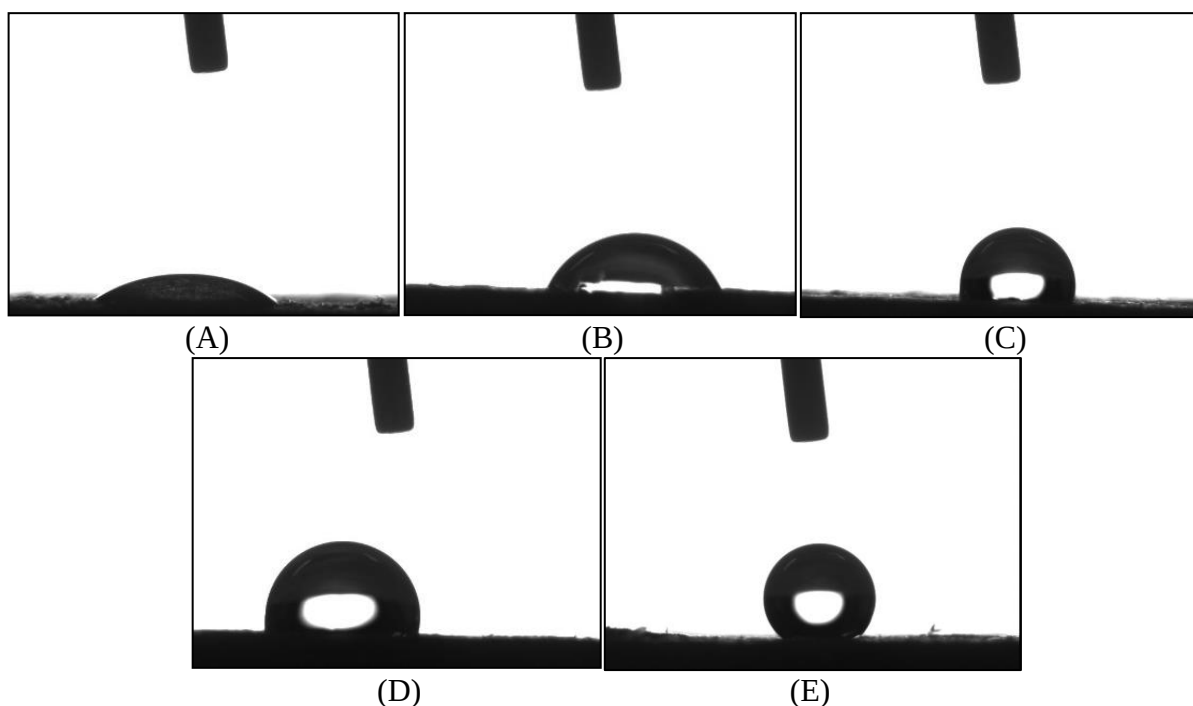
A análise de variância ($F_{\text{value}} = 1870,9$; $p\text{-value} = 2,2 \times 10^{-16} < 5\%$) mostrou que houve diferença significativa entre a angulação da gota. Pôde-se notar que houve diferença significativa entre as temperaturas de termorretificação, evidenciando que o aumento da temperatura aumenta o ângulo da gota, diminuindo, portanto, a molhabilidade da superfície. Isso mostra que a termorretificação e o aumento da temperatura tornam a superfície mais hidrofóbica, o que influencia na colagem do painel compensado, pois o adesivo utilizado fenol-

formaldeído é um adesivo solúvel em água. A Figura 46 apresenta a disposição dos dados para melhor visualização dos resultados.

Isto está diretamente ligado com o aumento do teor de extrativos nas temperaturas de 180°C e 200°C, tornando a superfície mais hidrofóbica. Na temperatura de 160°C, houve uma diminuição do teor de extrativos. Entretanto, devido às altas temperaturas, os extrativos que ainda permanecem na madeira tendem a se transportar para a superfície, tornando-a mais hidrofóbica.

O valor do ângulo de gota para a amostra de referência foi cerca de 45,72% menor comparado à temperatura de 160°C e 58,49% menor comparado à temperatura de 200°C, mostrando que a penetração e a fluidez da gota sobre a superfície sem tratamento foram maiores. Isso evidencia, que a termorretificação diminui a penetração e a fluidez da água e de qualquer outra substância hidrofílica. A Figura 47 apresenta as gotas obtidas no goniômetro digital para cada tratamento.

Figura 47 – Gotas obtidas no goniômetro; (A) Referência; (B) 160°C; (C) 180°C; (D) 200°C; (E) CCA.



Fonte: Autor

Windeisen, Strobel e Wegener (2007) apresentaram em seu estudo, que na termorretificação a 200°C ocorreu uma diminuição de 60% na quantidade de grupos hidroxílicos alifáticos. Isso justifica a diminuição de molhabilidade com o aumento da temperatura, pois torna a superfície mais hidrofóbica. Outro motivo foi o acúmulo de extrativos

na superfície da lâmina devido a degradação das hemiceluloses e, também, a própria movimentação dos extrativos do interior para a superfície.

Com relação a gota formada na lâmina tratada com CCA percebeu-se que foi a que apresentou o maior ângulo de contato com a madeira. Desta forma, percebeu-se que o CCA também diminui a molhabilidade da superfície de forma significativa. Isso pode ser justificado pelo que foi exposto na Figura 45, onde percebeu-se que o CCA, especialmente o cromo, se distribui por toda a superfície da lâmina, formando uma camada que impediu uma boa interação entre a água e madeira.

5.5. Ensaio físicos

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios físicos com o desvio padrão e o coeficiente de variação. Em seguida, está apresentada a discussão de cada ensaio físico separadamente.

Tabela 5 – Resultados obtidos nos ensaios físicos.

Tratamento		Massa Específica (g/cm ³)		Teor de umidade (%)		Inchamento em espessura (%)	
		Lâmina	Painel	Lâmina	Painel	Lâmina	Painel
T160	Média	0,69	0,66	12,56	11,87	8,79	8,22
	DP ¹	(0,03)	(0,02)	(0,09)	(0,25)	(0,10)	(0,32)
	CV ²	4,3%	3,0%	0,7%	2,1%	1,1%	3,9%
T180	Média	0,67	0,67	12,27	11,34	8,17	8,45
	DP	(0,02)	(0,02)	(0,25)	(0,23)	(0,32)	(0,21)
	CV	3,0%	3,0%	2,0%	2,0%	3,9%	2,5%
T200	Média	0,65	0,66	12,26	10,44	7,88	6,96
	DP	(0,01)	(0,05)	(0,13)	(0,11)	(0,07)	(0,16)
	CV	1,5%	7,6%	1,1%	1,1%	0,9%	2,3%
TCCA	Média	0,66	0,66	13,04	16,03	6,87	7,84
	DP	(0,02)	(0,01)	(0,44)	(0,35)	(0,18)	(0,27)
	CV	3,00%	1,5%	3,40%	2,20%	2,60%	3,40%
Ref.	Média	0,66		12,61		8,68	
	DP	(0,02)		(0,16)		(0,39)	
	CV	3,0%		1,3%		4,5%	

¹ Desvio padrão; ² Coeficiente de variação

Fonte: autor

5.5.1. Massa específica aparente (ME)

A Tabela 6 apresenta os valores médios de massa específica aparente obtidos para todos os tratamentos analisados acompanhados de análise estatística.

Tabela 6 – Resultados médios de massa específica aparente (ME).

Massa Específica Aparente (g/cm ³)						
	Referência	T160	T180	T200	TCCA	Média
Lâmina	0,66 a ¹	0,69 a	0,67 a	0,65 a	0,66 a	0,67 A
Painel		0,66 a	0,67 a	0,66 a	0,66 a	0,66 A
Média	0,66 A ²	0,68 A	0,67 A	0,66 A	0,66 A	

¹Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$);

²Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, médias das colunas devem ser analisadas separadamente das médias das linhas (Tukey, $\alpha = 5\%$);

Fonte: Autor

Não foi observada interação significativa entre os tratamentos e a forma de tratamento (F-value = 1,2782; p-value = 0,2911 > 5%). A análise dos efeitos principais mostrou que não houve diferença significativa entre os tratamentos realizados (F-value = 2,3930; p-value = 0,0629 > 5%), ou seja, os tratamentos não influenciaram na densidade do painel. Também não foi notada diferença significativa entre as formas de tratamento (F-value = 0,4054; p-value = 0,5272 > 5%). Portanto, o tratamento da lâmina ou do painel também não influenciaram a massa específica.

A Figura 48 apresenta o gráfico de interação dos fatores para a massa específica, para visualização dos resultados entre todos os tratamentos estudados.

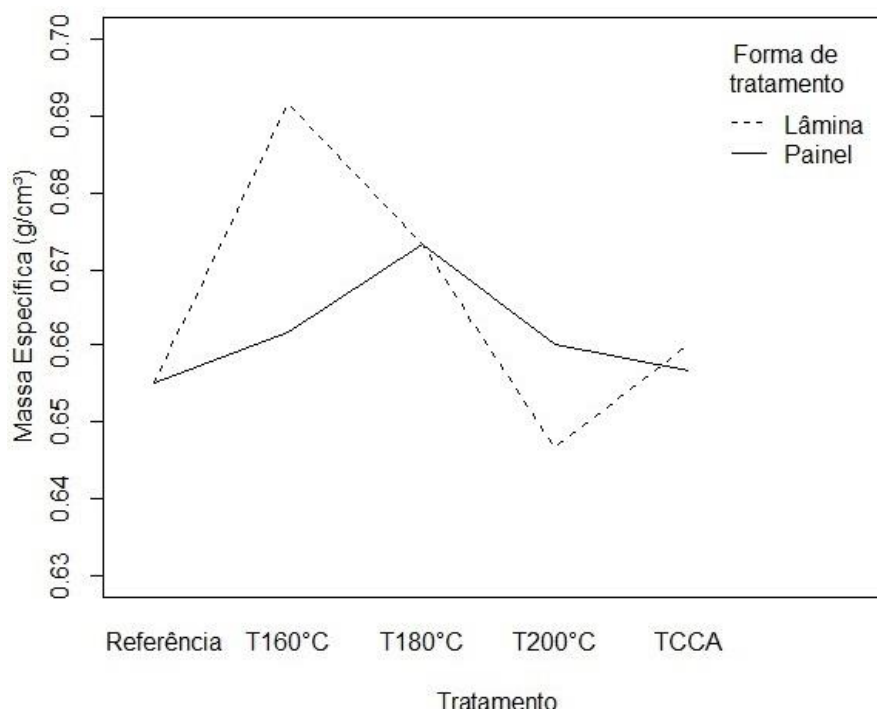
Apesar de ter havido aumento na perda de massa com o aumento da temperatura de termorretificação, isso não afetou a massa específica do painel. Isso pode ser justificado pelo fato de a perda de massa, mesmo presente, não ter sido muito elevada, sendo a mais alta para a temperatura de 200°C de apenas 2,15%.

Em um estudo realizado por Brito et al. (2006), onde foi estudada a termorretificação na madeira de *Eucalyptus grandis* nas temperaturas de 120°C, 140°C, 160°C, 180°C e 200°C, também não foi detectada influência significativa do tratamento na densidade básica da madeira, para nenhuma das temperaturas estudadas.

Entretanto, Poubel et al. (2013) notaram diminuição da densidade da madeira de *Pinus caribea* com a termorretificação nas temperaturas de 200°C e 220°C. Isso ocorreu devido à

grande perda de massa apresentada em seu estudo, que foi de 10,41% para temperatura de 200°C e de 19,48% para 220°C.

Figura 48 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para a massa específica.



Fonte: autor

Os painéis tratados com CCA também não tiveram sua massa específica alterada para nenhuma das formas de tratamento, apesar de ter havido absorção de sais de CCA durante o tratamento. No estudo realizado por Mendes et al. (2013), no qual foi realizado tratamento preservativo com CCA e CCB em compensados de madeira de *Pinus taeda*, em condições muito semelhantes ao presente estudo, também não foi notada influência do tratamento preservativo sobre a massa específica dos painéis produzidos.

Em todos os casos, a massa específica aparente se apresentou menor que 0,70 g/cm³, mais especificamente com valores médios variando entre 0,65 g/cm³ e 0,69 g/cm³, resultando em um painel de média densidade como encontrado na literatura (IWAKIRI, 2005). Em comparação ao Catálogo Técnico para Painéis de Compensado de Pinus proposto pela ABIMCI (2007) o compensado de 7 lâminas com 18 mm de espessura deve ter valores de massa específica aparente variando entre 0,496 e 0,620 g/cm³. Os valores obtidos neste estudo se apresentaram próximos aos exigidos por órgãos especializados. Observou-se ainda que os diferentes tratamentos realizados não apresentaram variações significativas na massa específica aparente. Portanto, a massa específica aparente não é fator decisivo e limitante na escolha do melhor tratamento.

5.5.2. Teor de umidade

A Tabela 7 apresenta os valores médios de teor de umidade obtidos em todas as condições analisadas acompanhados de análise estatística.

Tabela 7 – Resultados médios do teor de umidade (TU).

		Teor de Umidade (%)				
	Referência	T160	T180	T200	TCCA	Média
Lâmina	12,61 de ¹	12,56 d	12,27 cd	12,26 cd	13,04 e	12,55 A
Painel		11,87 c	11,34 b	10,44 a	16,03 f	12,46 A
Média	12,61 A ²	12,22 B	11,81 C	11,35 D	14,54 E	

¹Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$);

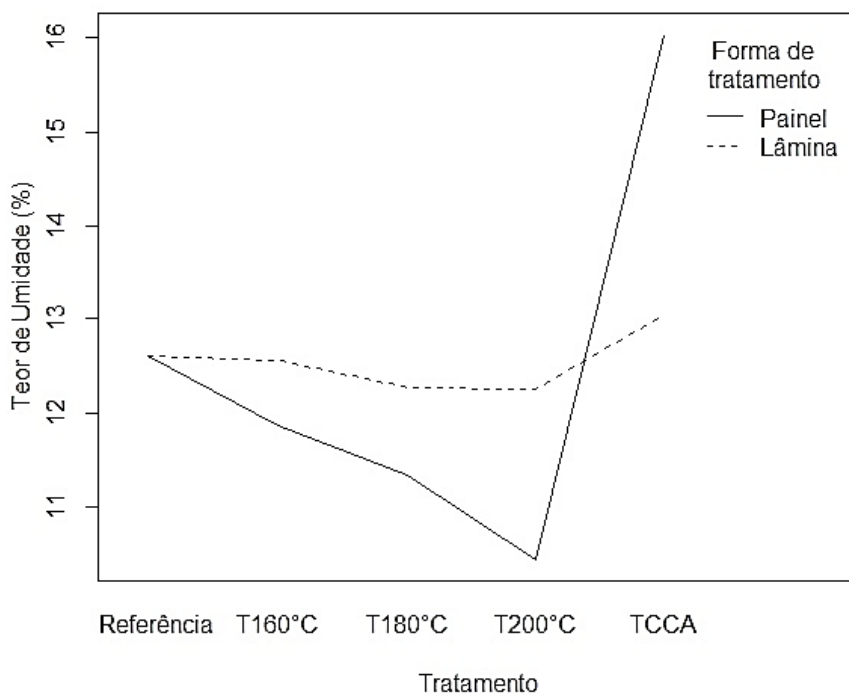
²Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, médias das colunas devem ser analisadas separadamente das médias das linhas (Tukey, $\alpha = 5\%$);
Fonte: Autor

Para o teor de umidade, foi observada interação significativa entre os tratamentos e as formas de tratamento (F-value = 174,16; p-value = $2,0 \times 10^{-6} < 5\%$). A análise dos efeitos principais mostrou que houve diferença significativa entre os tratamentos realizados (F-value = 311,54; p-value = $2,0 \times 10^{-16} < 5\%$), ou seja, os tratamentos influenciaram no teor de umidade do painel. Entretanto, não foi notada diferença significativa entre as formas de tratamento (F-value = 0,117; p-value = $2,0 \times 10^{-16} > 5\%$).

Como houve interação, faz-se necessária a análise do gráfico de interação, para se ter uma análise mais precisa dos resultados, o qual está apresentado na Figura 49.

Pode-se perceber, que tanto o tratamento das lâminas quanto o tratamento dos painéis obtiveram diminuição do teor de umidade com o aumento da temperatura de termorretificação. Entretanto, isto ficou mais evidenciado no tratamento do painel, do que no tratamento das lâminas, pelo fato da termorretificação ter sido realizada na etapa final, onde não houve mais adição de água no processo. No estudo realizado por Yildiz, Gezer e Yildiz (2006), ficou evidenciado que a termorretificação diminuiu a umidade de equilíbrio da madeira, o mesmo que ocorreu com o teor de umidade neste estudo. Isso se deve ao fato de que a termorretificação diminui a higroscopicidade da madeira, devido a esterificação dos grupos hidroxílicos das hemiceluloses, degradadas durante o tratamento, como apontado por Tjeerdsma e Militz (2005).

Figura 49 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para o teor de umidade.



Fonte: Autor

Quanto ao tratamento com CCA, os teores de umidade foram maiores, devido ao tratamento de célula cheia realizado, no qual tanto a lâmina quanto o painel foram submersos na solução de CCA, que é uma solução aquosa. O processo fez com que o painel absorvesse mais água, permanecendo com mais água que os outros, mesmo após ser seco ao ar. O tratamento do painel apresentou maior teor de umidade em comparação ao tratamento das lâminas pelo fato do tratamento em autoclave ter sido a etapa final.

A partir dos resultados apresentados verificou-se que os tratamentos estudados tiveram teor de umidade variando entre 10,46% e 16,07%. Em comparação ao Catálogo Técnico para Painéis de Compensado de Pinus proposto pela ABIMCI (2007), o compensado de 7 lâminas com 18 mm de espessura deve ter valores de teor de umidade entre 10% e 12%. Em comparação a resultados encontrados na literatura, observou-se que Mendes *et al.* (2013) encontraram valores entre 10,1% e 12,5% para painéis compensado, tratados com CCA e CCB.

Para todos os tratamentos das lâminas ou painéis termorretificados, o teor de umidade esteve próximo às recomendações da ABIMCI. No entanto, no tratamento com CCA, tanto das lâminas quanto dos painéis, o teor de umidade foi superior, podendo ser justificado pelo tratamento em autoclave pelo método de célula cheia, o qual submeteu as lâminas e os painéis à imersão em solução aquosa de CCA com ciclos de pressão e vácuo. A partir dos resultados

obtidos verifica-se que a forma de tratamento pode ser um fator decisivo na escolha do melhor tratamento.

5.5.3. Inchamento em espessura (IE)

A Tabela 8 apresenta os valores médios de inchamento em espessura obtidos nos tratamentos acompanhados de análise estatística.

Tabela 8 – Resultados médios de inchamento em espessura (IE).

Inchamento em espessura (%)						
	Referência	T160	T180	T200	TCCA	Média
Lâmina	8,68c ¹	8,79c	8,17c	7,88bc	6,87a	7,91A
Painel		8,22c	8,45c	6,96ab	7,84abc	8,19A
Média	8,68A ²	8,50A	8,31A	7,42B	7,36B	

¹Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$);

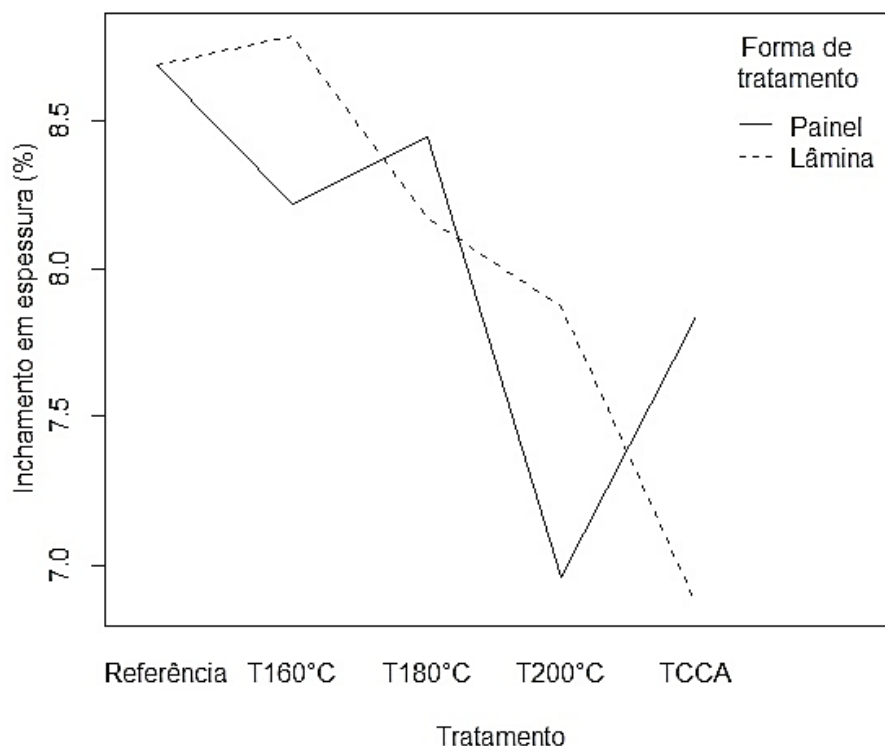
²Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, médias das colunas devem ser analisadas separadamente das médias das linhas (Tukey, $\alpha = 5\%$);

Fonte: Autor

Foi observada interação significativa entre os tratamentos e as formas de tratamento (F-value = 7,14; p-value = $9,6 \times 10^{-4} < 5\%$). A análise dos efeitos principais mostrou que houve diferença significativa entre os tratamentos (F-value = 20,48; p-value = $7,6 \times 10^{-7} < 5\%$), ou seja, os tratamentos influenciaram no inchamento do painel. Entretanto, não foi notada diferença significativa entre as formas de tratamento (F-value = 0,15; p-value = $0,70 > 5\%$). Como houve interação, faz-se necessária a análise do gráfico de interação, para se ter uma análise mais precisa dos resultados, o qual está apresentado na Figura 50.

Houve uma tendência de diminuição do inchamento em espessura com o aumento da temperatura de termorretificação, tanto para o tratamento da lâmina quanto para o tratamento do painel. Entretanto, essa diminuição foi significativa apenas para a temperatura de 200°C. Vale ressaltar que nessa temperatura foi onde houve a menor molhabilidade da superfície na termorretificação, como visto anteriormente, o que justifica esse menor inchamento.

Figura 50 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para o inchamento em espessura



Fonte: Autor

Observou-se também, que na temperatura de 200°C o tratamento feito no painel promoveu menor inchamento do que o tratamento feito nas lâminas. Isso se justifica pelo fato de a qualidade da colagem ter sido melhor no tratamento do painel, já que não houve influência da lâmina termorretificada na colagem, consequentemente o inchamento em espessura foi menor.

No estudo realizado por Poubel et al. (2013), a termorretificação melhorou a estabilidade dimensional da madeira, diminuindo 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 do compensado. Weiland e Guyonnet (2003) afirmam que a principal consequência da termorretificação é a maior estabilidade dimensional da madeira, o que ficou comprovado também neste estudo para o compensado, pois o inchamento do painel diminuiu com a termorretificação, tanto para o tratamento das lâminas quanto para o tratamento do painel.

Verificou-se, que o tratamento com CCA diminuiu o inchamento em espessura do compensado e isso é uma característica muito interessante do CCA. Esta diminuição no inchamento é justificada pelo fato dos sais de CCA diminuírem a molhabilidade da superfície da madeira, diminuindo a capacidade da parede celular absorver água e, assim, o painel inchará menos.

A partir dos resultados apresentados verifica-se que os tratamentos estudados tiveram inchamento em espessura variando entre 6,86% e 9,61%. O Catálogo Técnico para Painéis de Compensado de Pinus proposto pela ABIMCI (2007) não apresenta valores referenciais para inchamento em espessura. No entanto, observou-se que em comparação com estudos encontrados na literatura os valores obtidos neste estudo encontram-se próximos. Mendes *et al.* (2013) obtiveram valores de IE variando entre 7,84% e 8,37% para painéis compensados tratados com CCA e CCB.

Em todos os tratamentos houve diminuição do inchamento em espessura em comparação com a referência, indicando a melhoria da estabilidade dimensional quando lâminas ou painéis são submetidos a tratamentos seja térmico ou por CCA, sendo que os melhores valores foram obtidos para o tratamento da lâmina com CCA e o tratamento do painel à 200°C.

5.6. Ensaio mecânicos

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos nos ensaios mecânicos com o desvio padrão e o coeficiente de variação. Em seguida, está apresentada a discussão de cada ensaio mecânico separadamente.

Tabela 9 – Resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

Tratamento		Cisalhamento na linha de cola (MPa)		Flexão Estática							
				Paralela				Perpendicular			
				MOR		MOE		MOR		MOE	
		Lâmina	Painel	Lâmina	Painel	Lâmina	Painel	Lâmina	Painel	Lâmina	Painel
	Média	3,27	2,98	52,37	61,03	8498	8565	30,66	31,73	3182	3417
T160	DP¹	(0,16)	(0,41)	(8,93)	(9,15)	(956)	(910)	(4,04)	(4,88)	(386)	(441)
	CV²	4,9%	13,7%	17,1%	15,0%	11,2%	10,6%	13,2%	12,9%	12,1%	12,9%
	Média	2,77	3,1	49,42	56,62	8154	8248	26,63	28,55	3124	3155
T180	DP	(0,19)	(0,40)	(6,67)	(14,97)	(961)	(651)	(5,27)	(3,65)	(347)	(411)
	CV	6,8%	12,9%	13,5%	26,4%	11,8%	7,9%	19,8%	12,8%	11,1%	13,0%
	Média	2,31	2,58	46,98	44,28	8000	8151	26,12	27,62	3170	3094
T200	DP	(0,20)	(0,32)	(16,81)	(2,88)	(679)	(1553)	(4,39)	(3,34)	(477)	(499)
	CV	8,6%	12,4%	35,8%	6,5%	8,5%	19,1%	16,8%	12,1%	15,0%	16,1%
	Média	2,86	2,39	54,61	40,51	8111	5838	31,95	25,75	3382	2836
TCCA	DP	(0,10)	(0,34)	(6,92)	(9,26)	(1946)	(1235)	(0,94)	(3,74)	(308)	(527)
	CV	3,5%	14,2%	12,7%	22,8%	24,0%	21,1%	2,9%	14,5%	9,1%	15,6%
	Média	3,75		59,93		8958		32,89		3624	
Ref.	DP	(0,47)		(7,34)		(533)		(1,14)		(134)	
	CV	12,5%		12,2%		5,9%		3,5%		3,7%	

¹ Desvio padrão; ² Coeficiente de variação

Fonte: Autor

5.6.1. Cisalhamento na linha de cola

A Tabela 10 apresenta os valores médios de cisalhamento na linha de cola obtidos nos tratamentos acompanhados de análise estatística.

Tabela 10 – Resultados médios cisalhamento na linha de cola.

		Tensão de cisalhamento (MPa)				
	Referência	T160	T180	T200	TCCA	Média
Lâmina	3,75a	3,27ab	2,77bcde	2,31e	2,86bcde	2,99A
Painel		2,98bcd	3,10bc	2,58cde	2,39de	2,96A
Média	3,75A¹	3,13B	2,93BC	2,44D	2,62CD	

¹Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$);

²Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, médias das colunas devem ser analisadas separadamente das médias das linhas (Tukey, $\alpha = 5\%$);

Fonte: Autor

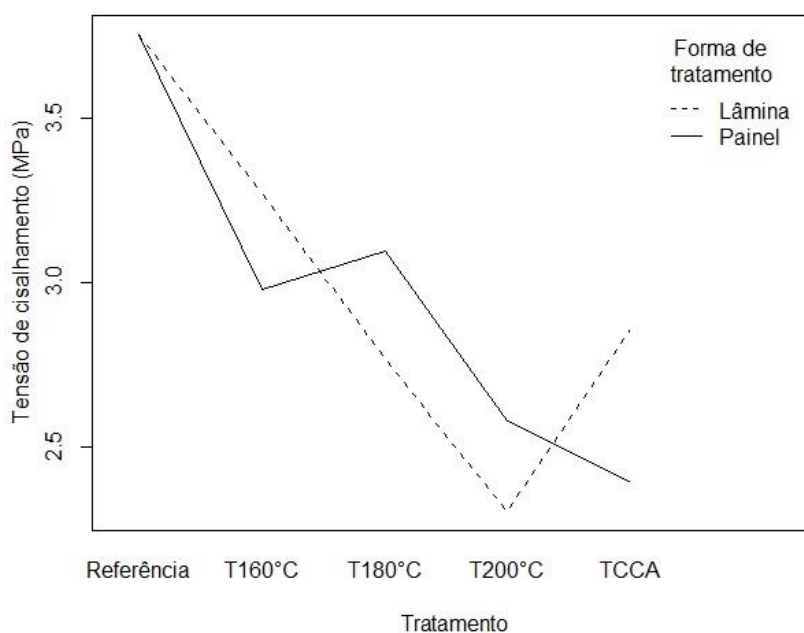
Para o cisalhamento na linha de cola, foi observada interação significativa entre os tratamentos e as formas de tratamento (F-value = 3,27; p-value = 0,018 < 5%). A análise dos efeitos principais mostrou que houve diferença significativa entre os tratamentos realizados (F-value = 28,2; p-value = $2,79 \times 10^{-12}$ < 5%), ou seja, os tratamentos influenciaram na tensão de cisalhamento. Entretanto, não foi notada diferença significativa entre as formas de tratamento (F-value = 0,13; p-value = 0,72 > 5%). Como houve interação, faz-se necessária a análise do gráfico de interação, para se ter uma análise mais precisa dos resultados, o qual está apresentado na Figura 51.

Ambos os tratamentos, lâmina e painel, apresentaram diminuição da resistência ao cisalhamento na linha de cola na termorretificação, indicando diminuição na qualidade de colagem do painel.

No caso do tratamento da lâmina houve uma evidente diminuição da resistência ao cisalhamento na linha de cola com o aumento da temperatura. Isso pode ser justificado pelo fato de ter ocorrido a diminuição da molhabilidade da superfície, o aumento do teor de extrativos com seu deslocamento para a superfície e a diminuição da rugosidade superficial com o aumento da temperatura, diminuindo a interação entre a superfície da lâmina e o adesivo fenol-formaldeído.

A maior diminuição da resistência ocorreu na temperatura de 200°C, onde houve a menor qualidade de colagem aliado a menor rugosidade, maior teor de extrativos e menor molhabilidade, como já visto anteriormente.

Figura 51 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para o cisalhamento na linha de cola.



No caso da termorretificação do painel, apesar de não ter havido uma diminuição gradativa da resistência ao cisalhamento, ainda assim elas mantiveram uma tendência de diminuição e foram menores do que o valor de referência, como pôde ser visto no gráfico da Figura 51. Neste caso, não foi a colagem em si que mais influenciou na diminuição da resistência, mas sim a madeira que perdeu suas propriedades de resistência devido a degradação térmica.

Entretanto, no estudo realizado por Pincelli, Brito e Corrente (2002), onde testou-se diferentes adesivos para colagem de madeira, não houve influência da termorretificação na qualidade de colagem da madeira. Isso foi o oposto do que foi encontrado neste trabalho para o compensado.

No caso do tratamento com CCA, também houve diminuição significativa na resistência ao cisalhamento na linha de cola em relação à referência e às temperaturas de até 180°C, em ambas as formas de tratamento.

Como pode ser visto na Figura 51, o tratamento do painel com CCA apresentou menores valores de cisalhamento do que o tratamento das lâminas. Apesar do tratamento da lâmina ter diminuído a molhabilidade da superfície, devido à disposição dos elementos químicos na

mesma formando uma película, os resultados obtidos foram mais elevados que o tratamento do painel. Isso mostra que o tratamento em si, pelo método de célula cheia, no qual o painel já produzido foi imerso em solução aquosa e sofreu influência de pressão e vácuo, foi mais agressivo à sua qualidade, influenciando mais na perda da qualidade de colagem.

A partir dos resultados apresentados verificou-se que os tratamentos estudados tiveram resistência ao cisalhamento na linha de cola variando entre 3,75 MPa e 2,31 MPa. O Catálogo Técnico para Painéis de Compensado de Pinus proposto pela ABIMCI (2007) não apresenta valores referenciais para a qualidade de colagem obtida no teste de cisalhamento na linha de cola para painéis secos. No entanto, Mendes *et al.* (2013) obteve valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola para painéis compensados tratados com CCA e CCB variando entre 2,96 MPa a 2,33 MPa. O documento normativo ABNT NBR ISO 12466-2 (2012) apresenta valores referenciais conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Valores referenciais para o teste de cisalhamento na linha de cola propostos pela ABNT NBR ISO 12466-2: 2012.

Tensão de ruptura ao cisalhamento – t_r (MPa)	Falha na madeira (%)
$0,2 \leq t_r < 0,4$	≥ 80
$0,4 \leq t_r < 0,6$	≥ 60
$0,6 \leq t_r < 1,0$	≥ 40
$t_r \geq 1,0$	Sem exigência

Fonte: (ABNT NBR ISO 12466-2, 2012).

Os resultados obtidos no teste de cisalhamento na linha de cola indicaram que independente do tratamento realizado, os painéis sempre atenderam aos limites normativos, indicando que os tratamentos apesar de reduzirem a resistência do painel, ainda assim continuaram atendendo os valores propostos sem a necessidade de avaliar se a ruptura ocorreu por falha na madeira.

5.6.2. Flexão estática paralela e perpendicular

A Tabela 12 apresenta as médias do Módulo de Ruptura (MOR) na flexão estática paralela acompanhados de análise estatística.

Tabela 12 – Resultados médios do MOR na flexão estática paralelo às fibras.

MOR paralelo (MPa)						
	Referência	T160	T180	T200	TCCA	Média
Lâmina	59,93a ¹	52,37a	49,42a	46,98a	54,61a	52,66A
Painel		61,03a	56,62a	44,29a	40,50a	52,47A
Média	59,93A ²	56,70AB	53,02AB	45,63B	47,56AB	

¹Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$);

²Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, médias das colunas devem ser analisadas separadamente das médias das linhas (Tukey, $\alpha = 5\%$);

Fonte: Autor

Para o MOR paralelo não foi observada interação significativa entre os tratamentos e as formas de tratamento (F-value = 1,72; p-value = 0,17 > 5%). A análise dos efeitos principais mostrou que houve diferença significativa entre os tratamentos realizados (F-value = 3,0; p-value = 0,034 < 5%), ou seja, os tratamentos influenciaram no MOR paralelo. Entretanto, não foi notada diferença significativa entre as formas de tratamento (F-value = 0,0037; p-value = 0,95 > 5%). Para melhor entendimento dos resultados, faz-se necessária a análise do gráfico de interação, o qual está apresentado na Figura 52A.

A Tabela 13 apresenta as médias do Módulo de Ruptura (MOR) na flexão estática perpendicular acompanhados de análise estatística.

Tabela 13 – Resultados médios do MOR na flexão estática perpendicular às fibras.

MOR perpendicular (MPa)						
	Referência	T160	T180	T200	TCCA	Média
Lâmina	32,89a ¹	30,66a	26,63a	26,12a	31,95a	29,65 A
Painel		31,73a	28,55a	27,62a	25,75a	29,31 A
Média	32,89A ²	31,20AB	27,59B	26,87B	28,85AB	

¹Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$);

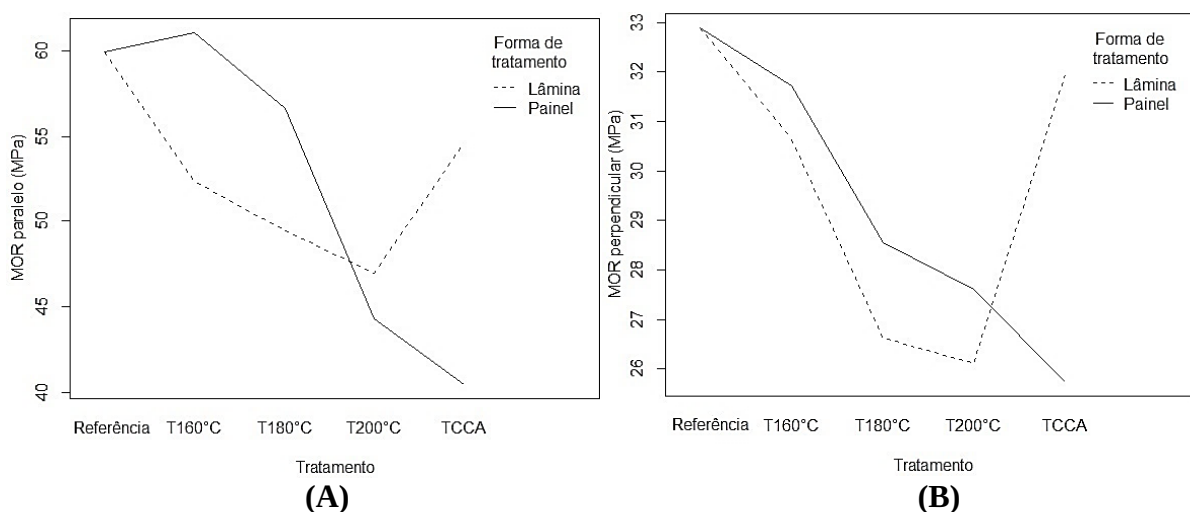
²Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, médias das colunas devem ser analisadas separadamente das médias das linhas (Tukey, $\alpha = 5\%$);

Fonte: Autor

Para o MOR perpendicular não foi observada interação significativa entre os tratamentos e as formas de tratamento (F-value = 1,74; p-value = 0,17 > 5%). A análise dos efeitos principais

mostrou que houve diferença significativa entre os tratamentos realizados ($F\text{-value} = 3,9$; $p\text{-value} = 0,011 < 5\%$), ou seja, os tratamentos influenciaram no MOR perpendicular. Entretanto, não foi notada diferença significativa entre as formas de tratamento ($F\text{-value} = 0,0903$; $p\text{-value} = 0,76 > 5\%$). Para melhor entendimento dos resultados, faz-se necessária a análise do gráfico de interação, o qual está apresentado na Figura 52B.

Figura 52 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para o Módulo de Ruptura; (A) MOR paralelo; (B) MOR perpendicular.



Fonte: Autor

Verificou-se pelos resultados obtidos de MOR, que houve um decréscimo desta propriedade com o tratamento térmico, especialmente na temperatura de 200°C, tanto para o paralelo quanto no perpendicular. Isso ocorre devido a degradação térmica da madeira, tornando a parede celular mais frágil. Os menores valores foram os obtidos para as temperaturas de 180°C e 200°C, as quais neste estudo não foram significativamente diferentes entre si.

O motivo pelo qual o aumento da temperatura de termorretificação diminuiu a resistência à flexão estática foi a degradação da madeira que ocorreu neste processo. Kačíková et al. (2013), relataram em seu estudo que para temperaturas a partir de 160°C começa a haver degradação significativa das hemiceluloses, as quais possuem uma correlação direta com o MOR, de forma que, enquanto as hemiceluloses são degradadas há uma diminuição do MOR da madeira. A mesma tendência foi verificada neste estudo, já que a termorretificação foi realizada a partir de 160°C.

Outro motivo que influenciou na diminuição do módulo de ruptura, foi a redução da qualidade de colagem conforme se aumentou a temperatura de termorretificação, desta forma o compensado suportou menos carga, já que a colagem foi prejudicada.

No caso do tratamento com CCA, ocorreu também diminuição do MOR após o tratamento. Entretanto, esta diminuição foi muito maior quando painel foi tratado em comparação com tratamento da lâmina, como pode ser visto na Figura 52, tanto no paralelo quanto no perpendicular. Isto indica que o tratamento com célula cheia no painel prejudica muito mais a resistência mecânica do que o tratamento das lâminas, semelhante ao que ocorreu no cisalhamento da linha de cola.

Mendes et al. (2013) também verificaram que o tratamento químico com CCA e CCB em compensados de madeira diminuiu o MOR dos painéis, e isso foi devido ao aumento do teor de umidade após o tratamento. O mesmo que ocorreu neste estudo, onde também houve aumento no teor de umidade, especialmente no tratamento do painel pelo método de célula cheia.

O catálogo ABIMCI (2007) apresenta valores médios e mínimos de MOR paralelo de 40,13 MPa e 27,38 MPa e de MOR perpendicular de 33,78 MPa e 20,58 MPa para painel de 7 lâminas com espessura de 180 mm, respectivamente. Apesar de ter havido diminuição no MOR paralelo e perpendicular, em todos os casos, inclusive no tratamento com CCA do painel, os valores mínimos exigidos foram atendidos.

A Tabela 14 apresenta as médias do Módulo de Elasticidade (MOE) na flexão estática paralela acompanhados de análise estatística.

Tabela 14 – Resultados médios do MOE na flexão estática paralela às fibras.

MOE paralelo (MPa)						
	Referência	T160	T180	T200	TCCA	Média
Lâmina	8958a ¹	8498a	8154ab	8000ab	8111ab	8344 A
Painel		8565a	8248ab	8151ab	5838b	7952 A
Média	8957A ²	8532A	8201AB	8076AB	6975B	

¹Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$);

²Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, médias das colunas devem ser analisadas separadamente das médias das linhas (Tukey, $\alpha = 5\%$);

Fonte: Autor

Para o MOE paralelo não foi observada interação significativa entre os tratamentos e as formas de tratamento (F-value = 1,87; p-value = 0,14 > 5%). A análise dos efeitos principais mostrou que houve diferença significativa entre os tratamentos realizados (F-value = 3,7; p-value = 0,015 < 5%), ou seja, os tratamentos influenciaram no MOE paralelo. Entretanto, não foi notada diferença significativa entre as formas de tratamento (F-value = 1,3; p-value = 0,26 > 5%). Para melhor entendimento dos resultados, faz-se necessária a análise do gráfico de interação, o qual está apresentado na Figura 53A.

A Tabela 15 apresenta as médias do Módulo de Elasticidade (MOE) na flexão estática perpendicular acompanhados de análise estatística.

Tabela 15 – Resultados médios do MOE na flexão estática perpendicular às fibras.

MOE perpendicular (MPa)						
	Referência	T160	T180	T200	TCCA	Média
Lâmina	3624a ¹	3182a	3124a	3170a	3382a	3296 A
Painel		3417a	3155a	3094a	2836a	3225 A
Média	3624A ²	3300A	3140A	3132A	3109A	

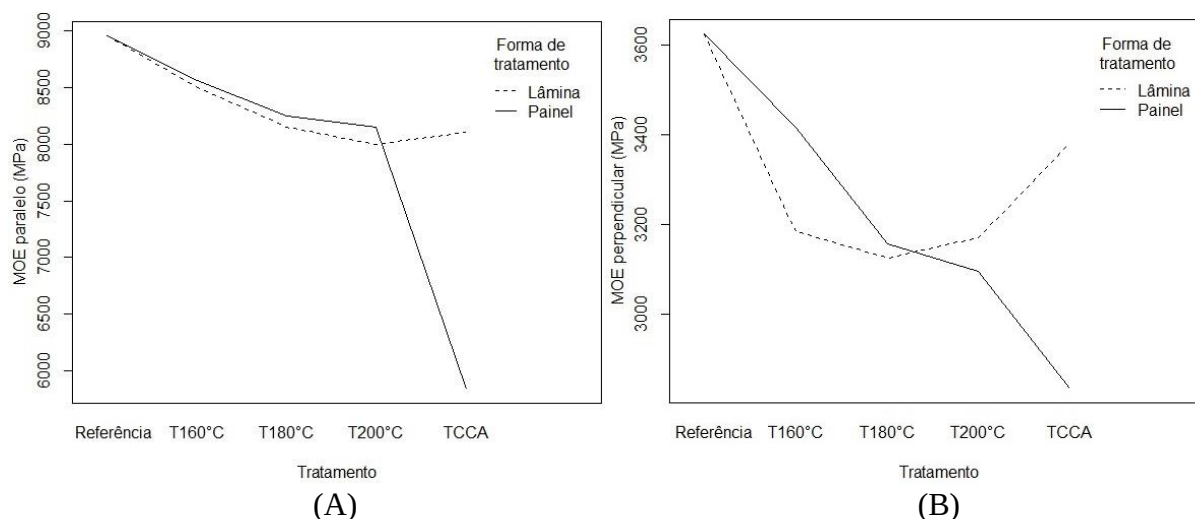
¹Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si (Tukey, $\alpha = 5\%$);

²Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem estatisticamente entre si, médias das colunas devem ser analisadas separadamente das médias das linhas (Tukey, $\alpha = 5\%$);

Fonte: Autor

Para o MOE perpendicular não foi observada interação significativa entre os tratamentos e as formas de tratamento (F-value = 1,10; p-value = 0,37 > 5%). A análise dos efeitos principais mostrou que não houve diferença significativa entre os tratamentos realizados (F-value = 2,47; p-value = 0,065 > 5%). Além disso, não foi notada diferença significativa entre as formas de tratamento (F-value = 0,33; p-value = 0,56 > 5%). Para melhor entendimento dos resultados, faz-se necessária a análise do gráfico de interação, o qual está apresentado na Figura 53B.

Figura 53 – Gráfico da interação entre os efeitos principais para o Módulo de Elasticidade; (A) MOE paralelo; (B) MOE perpendicular.



Fonte: Autor

Assim como ocorreu com o MOR, o MOE também teve uma tendência de diminuição com a termorretificação, mas esta diminuição não foi significativa para a direção perpendicular e nem para a direção paralela. No estudo da madeira serrada realizado por Kačíková et al.

(2013), entretanto, encontraram uma diminuição no MOE com o aumento da temperatura de termorretificação assim como ocorreu para o MOR.

No caso do tratamento com CCA, pode-se perceber pelos gráficos da Figura 53, que tanto no perpendicular quanto no paralelo, houve diminuição do MOE quando o tratamento foi realizado no painel, a mesma tendência foi observada para o MOR. Mendes et al. (2013) também relataram a diminuição do MOE em painéis tratados com CCA, justificado novamente pelo aumento do teor de umidade do painel após o tratamento.

O catálogo da ABIMCI (2007) cita valores médio e mínimo de MOE paralelo de 4900 MPa e 3100 MPa e de MOE perpendicular de 3300 MPa e 1760 MPa, respectivamente. Em todo os casos, os valores de MOE paralelo e perpendicular atenderam os valores mínimos.

Verificou-se, portanto, que tanto a termorretificação, quanto o tratamento com CCA diminuem as propriedades de flexão estática dos painéis produzidos com CCA. Kačíková et al. (2013) encontraram que o MOE e o MOR da madeira diminuíram com o aumento da temperatura de termorretificação, devido a degradação das hemiceluloses, principalmente. Mendes et al. (2013), relataram diminuição do MOE e MOR com o tratamento do painel compensado com CCA e CCB. Portanto, percebeu-se que o compensado produzido neste estudo seguiu o mesmo padrão do que foi encontrado na literatura, ou seja, as propriedades mecânicas da madeira diminuem com o aumento da temperatura de termorretificação e com o tratamento químico no método de célula cheia.

5.7. Considerações finais sobre os estudos realizados

Com os resultados obtidos percebeu-se que tanto o tratamento químico com CCA quanto o tratamento por termorretificação diminuíram a resistência mecânica do painel compensado de *Pinus taeda*. Entretanto, notou-se um aumento na resistência ao inchamento em espessura, portanto, houve uma melhor estabilidade dimensional do painel produzido.

Tanto o tratamento com CCA quanto o tratamento de termorretificação tornaram a superfície mais hidrofóbica, diminuindo a interação com água. Desta forma, houve uma diminuição no inchamento em espessura. No entanto, também diminuiu a interação da lâmina com o adesivo utilizado, o qual é à base de água.

Percebeu-se que no caso da termorretificação a temperatura de 200°C foi a que teve o menor desempenho mecânico. No entanto o melhor desempenho quanto ao inchamento em espessura. Por outro lado, apesar de ter havido esta diminuição nas propriedades mecânicas estas ainda foram próximas aos valores encontrados na literatura, e atingiram os valores

mínimos exigidos por órgãos especializados. Além disso, a boa relação observada neste estudo entre altas temperaturas de termorretificação e resistência ao ataque da madeira por fungos como relatado por Hakkou et al. (2006) e Boonstra et al. (2007), as quais afirmam que quanto maior a temperatura de termorretificação menor o ataque da madeira por fungos xilófagos, permitiu propor o tratamento de termorretificação à 200°C como o mais indicado.

Na termorretificação, como as diferenças entre o tratamento da lâmina e o tratamento do painel foram muito pequenas e em muitos casos não foram significativas, indica-se o tratamento do painel em vez do tratamento da lâmina, pois o tratamento do painel implica em uma etapa no final do processo, onde o painel já está produzido e não haverá perdas de material termorretificado nas etapas de acabamento.

No tratamento com CCA, fica claro com os resultados obtidos que o melhor caso é o tratamento das lâminas e não o tratamento do painel, já que este obteve valores de resistência mecânica muito inferiores e valores de inchamento em espessura mais elevados. No entanto, ressalta-se que haverá perdas de material tratado com CCA no processo de acabamento e, conseqüentemente, problemas com o descarte dos resíduos gerados.

Entre o tratamento com termorretificação de 200°C e o de CCA do painel, indica-se a utilização do painel termorretificado à 200°C, já que é muito menos agressivo ao homem e ao meio ambiente, pois não utiliza produtos químicos na sua produção, além de possuir perda de resistência mecânica semelhante e menor inchamento em espessura. Além disso, de acordo com a literatura citada anteriormente também possui boa resistência ao ataque de fungos xilófagos, podendo ser utilizado em construções do tipo *wood frame* e *steel frame*, principalmente como fechamento de paredes, tetos e contrapiso, onde o compensado já é usualmente utilizado em países de clima frio, onde o ataque é menos presente.

6. CONCLUSÕES

O estudo de painéis compensados submetidos a tratamentos térmico e químico apresentou-se como uma proposta interessante com relação desempenho físico-mecânico dos mesmos, especialmente, quanto à aplicação na construção civil, onde os painéis necessitam de propriedades de resistência para as funções as quais são indicados.

Com os resultados obtidos pode-se concluir que os tratamentos térmico e químico diminuíram a molhabilidade da lâmina. Este resultado foi verificado através da avaliação do ângulo de gota obtido para a referência, as três temperaturas e o CCA no goniômetro digital. A angulação aumentou com a elevação da temperatura de termorretificação e foi maior para o tratamento com CCA, evidenciando que os tratamentos tornaram a superfície da lâmina mais hidrofóbica.

O teor de extrativos totais também foi alterado com a termorretificação da seguinte forma: houve uma diminuição do teor de extrativos na temperatura de 160°C, devido a maior volatilização dos mesmos.; houve um aumento no teor de extrativos nas temperaturas de 180° e 200°C, respectivamente, devido a degradação mais acentuada das hemiceluloses e, conseqüentemente, formação de substâncias de menor peso molecular.

A microscopia eletrônica de varredura mostrou que a termorretificação e, por sua vez, o aumento da temperatura, diminuíram a rugosidade superficial da lâmina, tornando-a mais lisa, diminuindo, portanto, a interação entre a lâmina e o adesivo. Pela técnica de EDS, pôde-se perceber que o CCA, especialmente o cromo, formou uma película de proteção sobre a superfície da lâmina, o que influenciou na molhabilidade.

Nas propriedades físicas não houve alteração na massa específica dos painéis tratados, mesmo havendo reduzida perda de massa e absorção dos sais de CCA pela madeira. O teor de umidade diminuiu conforme o aumento da temperatura de termorretificação e foi alto para o tratamento com CCA, especialmente, no tratamento do painel, devido ao método de célula cheia. O inchamento em espessura diminuiu tanto com o aumento da temperatura de termorretificação, quanto para o tratamento com CCA, sendo menor no tratamento do painel à 200°C e no tratamento das lâminas com CCA.

Nas propriedades mecânicas houve diminuição tanto do cisalhamento na linha de cola, quanto na flexão estática para os tratamentos realizados. Entretanto, o mais afetado foi o cisalhamento na linha de cola, devido a influência direta que os tratamentos apresentaram sobre a interação do adesivo e a madeira, conseqüentemente, fragilizando a linha de cola. Apesar

disso, em todos os casos os resultados obtidos ainda atenderam os valores mínimos propostos por documentos especializados.

Mediante a estes resultados, foi exposto que os melhores tratamentos foram a termorreificação do painel a 200°C e o tratamento das lâminas com CCA. Dentre estes dois escolheu-se o tratamento por termorreificação a 200°C como o mais indicado devido ao menor impacto ambiental causado, como destacado no item 5.7.

6.1. Recomendações para trabalhos futuros

Sugere-se para próximos estudos a utilização de um adesivo hidrofóbico, como a resina poliuretana à base de mamona, que pode ter um melhor desempenho nestes tratamentos, devido ao aumento da hidrofobicidade das superfícies tratadas. Sugere-se ainda a realização de testes para avaliar o desempenho dos painéis tratados quanto ao ataque de agentes xilófagos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. **Engineered wood products primer awareness guide**. Washington: American Wood Council, 2006. Disponível em: <<http://www.woodaware.info/PDFs/EWPPPrimer.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2011.

AMERICAN FOREST AND PAPER ASSOCIATION. **Details for conventional Wood Frame construction**. Washington, DC, 2001. 55 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI. **Catálogo técnico de compensado de pinus**. 2007

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI. **Fluxograma de produção de compensado de madeira**. Curitiba, n.20, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI. **Fluxograma de produção de lâminas de madeira**. Curitiba, n.19, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9484**: Compensado: determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9485**: Compensado: determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9486**: Compensado: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9533**: Compensado: determinação da resistência à flexão estática. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9535**: Compensado: determinação do inchamento. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-1**: Madeira compensada – Qualidade de colagem parte 1: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 12466-2**: Madeira compensada – Qualidade de colagem parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

AWOYEMI, L.; JONES, I. P. Anatomical explanations for the changes in properties of western red cedar (*Thuja plicata*) wood during heat treatment. **Wood Science and Technology**, v. 45, n. 2, p. 261–267, 2011.

AYDIN, I.; COLAKOGLU, G. Variation in surface roughness, wettability and some plywood properties after preservative treatment with boron compounds. **Building and Environment**, West Lafayette, v. 42, n. 11, p. 3837–3840, 2007.

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

BHUIYAN, M. T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Changes of crystallinity in wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions. **Journal of Wood Science**, v. 46, n. 6, p. 431–436, 2000.

BOONSTRA, M. J.; VAN ACKER, J.; KEGEL, E.; STEVENS, M. Optimisation of a two-stage heat treatment process: Durability aspects. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 1, p. 31–57, 2007.

BRITO, O. B.; GARCIA, J. N.; BORTOLETTO JUNIOR, G.; PESSOA, A. M. C.; SILVA, P. H. M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorreificação. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 182-188, 2006.

BROSSE, N.; EL HAGE, R.; CHAOUCH, M.; PÉTRISSANS, M.; DUMARÇAY, S.; GÉRARDIN, P. Investigation of the chemical modifications of beech wood lignin during heat treatment. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 9, p. 1721–1726, 2010.

CLAUSEN, C. A. Biodeterioration of Wood. 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. 14.

CURRIER, R. A. The importance of lumber seasoning in wood gluing. **Western Dry Kiln Clubs**, Corvallis, OR. 4 p. 1961; Disponível em: <http://ir.library.oregonstate.edu/dspace/bitstream/1957/4872/1/Importance_Lumber_ocr.pdf>. Acesso em 10/06/2016.

D'ALMEIDA, M.L.O. **Celulose e Papel: Tecnologia de Fabricação de Pasta Celulósica**. 2 ed. 1988. IPT: São Paulo. Volume I. 559p.

EATON, R. A.; HALE, M. D. C. **Wood: Decay, pests and protection**. London: Chapman & Hall, 1993. 546 p.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastucture, reactions**. New York: De Gruyter, 1989.

FERRO, F. S. **Painéis OSB com madeira *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona: viabilidade técnica de produção**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. USP. São Carlos/SP. 2013.

FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION. ThermoWood Handbook. Helsinki, Finlândia, 2003. Disponível em: <http://www.vanhoorebeke.com/docs/Thermowood%20handboek.pdf>.

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. Cap. 10.

FRIHART, R. C. Wood Adhesion and Adhesives. In: ROWELL, M. R. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. Cap. 9.

GALVÃO, A. P. M.; MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOS, P. P. **Processos práticos para preservar madeira**: Documentos 96. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 49 p.

GONÇALVES, M. T. T. **Processamento da madeira**. Bauru: Document Center Xerox – USC, 2000. 242 p.

GONZÁLEZ-PEÑA, M. M.; CURLING, S. F.; HALE, M. D. C. On the effect of heat on the chemical composition and dimensions of thermally-modified wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 94, n. 12, p. 2184–2193, 2009.

GUNDUZ, G.; AYDEMIR, D.; KARAKAS, G. The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (*Pyrus elaeagnifolia* Pall.) wood and changes in physical properties. **Materials and Design**, v. 30, n. 10, p. 4391–4395, 2009.

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**, v. 99, n. 7, p. 2275–2280, 2008.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; GÉRARDIN, P.; ZOULALIAN, A. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, n. 2, p. 393–397, 2006.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório IBÁ 2015**. São Paulo, 2015.

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. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F.; BUBENÍKOVÁ, T. Influence of Fire on Spruce Wood Lignin Changes. **Wood Research**, v. 53, n. 4, p. 95–103, 2008.

KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F.; ČABALOVÁ, I.; ĎURKOVIČ, J. Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. **Bioresource Technology**, v. 144, p. 669–674, 2013.

KAMDEM, D. P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. Durability of heat-treated wood. **Holz als Roh - und Werkstoff**, v. 60, n. 1, p. 1–6, 2002.

KARTAL, S. N.; YOSHIMURA, T.; IMAMURA, Y. Decay and termite resistance of boron-treated and chemically modified wood by in situ co-polymerization of allyl glycidyl ether (AGE) with methyl methacrylate (MMA). **International Biodeterioration & Biodegradation**, Suitland, v. 53, n. 2, p. 111–177, 2004.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J.; **Principles of wood science and technology**: Wood based materials. Berlin: Springer-Verlag, 1975.

KORKUT, S. et al. The effects of heat treatment on technological properties in Red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) wood. **Bioresource Technology**, Mohali, v. 99, n. 6, p. 1538–1543, 2008.

KORKUT, 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.

LEBOW, S. T. Wood Preservation. 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. 14.

LOH, Y. F.; PARIDAH, T. M.; HOONG, T. B.; BAKAR, E. S.; ANIS, M.; HAMDAN, H. Resistance of phenolic-treated oil palm stem plywood against subterranean termites and white rot decay. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Suitland, v. 65, n. 1, p. 14-17, 2011.

MACHADO, J. S. **Placas de derivados de madeira**: tipos de placas e sua especificação. Lisboa: LNEC Divisão de edições e Artes Gráficas, 2005.

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

MENDES, R. F.; BORTOLETTO JUNIOR, G.; VIDAL, J. M.; ALMEIDA, N. F.; JANKOWSKY, I. P. Efeito do tratamento preservativo de painéis compensados sobre as suas propriedades físico-mecânicas. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 100, p. 507–513, 2013.

NAVI, P.; SANDBERG, D. Heat Treatment. In:_____. **Thermo-Hydro-Mechanical processing of wood**. Boca Raton: CRC Press, 2012. cap. 9.

NAZERIAN, M.; GHALEHNO, M. D.; KASHKOOLLI, 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**, n. 6, p. 980-987, 2011.

PARTNERSHIP FOR ADVANCED TECHNOLOGY IN HOUSING – PATH.

PESSOA, A. M. D. C.; BERTI FILHO, E.; BRITO, J. O. Avaliação da madeira termorretificada de *Eucalyptus grandis*, submetida ao ataque de cupim de madeira seca, *Cryptotermes brevis*. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 72, p. 11–16, 2006.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; BRITO, J. O.; CORRENTE, J. E. Avaliação da termorretificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 61, p. 122–132, 2002.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. New York: Marcel Dekker, 1994. 289 p.

PONCSAK, S.; KOCAEFE, D.; YOUNSI, R. Improvement of the heat treatment of Jack pine (*Pinus banksiana*) using ThermoWood technology. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, n. 2, p. 281–286, 2011.

POUBEL, D. S.; GARCIA, R. A.; SANTOS, W. A.; OLIVEIRA, G. L.; ABREU, H. S. Efeito da termorretificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus carieba*. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 391–398, 2013.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RODRIGUES, T. O. **Efeito da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 71f. 2009.

ROWELL, M. R.; PETTERSEN, R.; TSHABALALA, M. A. Cell Wall Chemistry. In: ROWELL, M. R. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013. Cap. 9.

SALCA, E. A.; HIZIROGLU, S. Evaluation of hardness and surface quality of different wood species as function of heat treatment. **Materials and Design**, v. 62, p. 416–423, 2014.

SCHMULSKY, R.; JONES, P. D. **Forest products and wood science: an introduction**. 6. ed. Chichester, UK: Wiley-Blackwell, 2011.

STAMATO, G. C. (2010). **Light wood frame: construções com estrutura leve de madeira**. Disponível em <http://www.stamade.com.br/artigos/publ01_revista_techne140.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2013.

STARK, N. M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-Based Composite Materials: Panel Products, Glued-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.

SWEET, M. S.; WINANDY, J. E. Influence of Degree of Polymerization of Cellulose and Hemicellulose on Strength Loss in Fire-Retardant-Treated Southern Pine. **Holzforschung**, v. 53, n. 3, p. 311–317, 1999.

TERZI, E.; TAŞÇIOĞLU, C.; KARTAL, S. N.; YOSHIMURA, T. Termite resistance of solid wood and plywood treated with quaternary ammonia compounds and common fire retardants. **International Biodeterioration & Biodegradation**, Suitland, v. 65, n. 3, p. 565–568, 2011.

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**, v. 56, p. 149–153, 1998.

TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 63, n. 2, p. 102–111, 2005.

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%20%E2minas>. Acesso em: 08 abri. 2016.

VALLE, M. L. A.; SILVA, J. C.; DELLA LUCIA, R. M.; EVANGELISTA, W. V. Retenção e penetração de CCA em madeira de primeira e segunda rotação de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 481-490, 2013.

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.

WIKBERG, H.; MAUNU, S. L. Characterisation of thermally modified hard- And softwoods by ¹³C CPMAS NMR. **Carbohydrate Polymers**, v. 58, n. 4, p. 461–466, 2004.

WINDEISEN, E.; STROBEL, C.; WEGENER, G. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. **Wood Science and Technology**, v. 41, n. 6, p. 523–536, 2007.

WINDEISEN, E.; WEGENER, G. Behaviour of lignin during thermal treatments of wood. **Industrial Crops and Products**, v. 27, n. 2, p. 157–162, 2008.

YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment**, v. 41, n. 12, p. 1762–1766, 2006.

YILDIZ, S.; GÜMÜŞKAYA, E. The effects of thermal modification on crystalline structure of cellulose in soft and hardwood. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 62–67, 2007.