

PAULO IVAN LIMA DE ANDRADE

**PAINÉIS DE PARTÍCULAS TERMORRETIFICADAS PRODUZIDOS COM
RESÍDUOS DE MADEIRA DE PINUS PROVENIENTE DE EMBALAGENS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

A553p
2013

Andrade, Paulo Ivan Lima de, 1988-
Painéis de partículas termorretificadas produzidos com
resíduos de madeira de pinus proveniente de embalagens /
Paulo Ivan Lima de Andrade. – Viçosa, MG, 2013.
viii, 67f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Benedito Rocha Vital
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 60-67

1. Madeira - Tratamento térmico. 2. Madeira aglomerada.
3. Resíduos vegetais. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.98422

PAULO IVAN LIMA DE ANDRADE

**PAINÉIS DE PARTÍCULAS TERMORRETIFICADAS PRODUZIDOS COM
RESÍDUOS DE MADEIRA DE PINUS PROVENIENTE DE EMBALAGENS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2013.

Carla Priscilla Távora Cabral

Daniel Câmara Barcellos

Angélica de Cássia O. Carneiro
(Coorientadora)

Ana Márcia M. L. Carvalho

Benedito Rocha Vital
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo eterno sustento.

Aos meus pais Ivan e Helenilze, pelo cuidado e apoio.

À Marcella, por estar sempre ao meu lado me incentivando.

A Universidade Federal de Viçosa, por possibilitar a realização do curso.

À CAPES, pela concessão da bolsa.

À FAPEMIG, pelo apoio financeiro para a realização do projeto.

Ao professor Benedito Rocha Vital, pela orientação, disponibilidade e atenção concedidas.

Às professoras Angélica de Cássia e Ana Márcia e ao engenheiro florestal Daniel Câmara Barcellos, pelas contribuições e sugestões no trabalho.

Às pesquisadoras Solange e Carla, pela amizade, conselhos e todo suporte oferecidos durante a realização deste trabalho.

Aos estagiários Pedro e Breno, pela amizade, disponibilidade e dedicação na realização das atividades.

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, Laboratório de Celulose e Papel e Marcenaria: Maninho, Bráulio, Moiado, Jaqueline, Osvaldo, Cláudio Bittencourt e Paulinho.

A todos os demais companheiros de laboratório – estagiários, mestrandos e doutorandos, que de alguma maneira contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído.

BIOGRAFIA

Paulo Ivan Lima de Andrade, filho de Ivan Andrade dos Santos e Helenilze A. Lima de Andrade, nasceu no dia 20 de abril de 1988, em Salinas-MG.

Cursou o ensino fundamental na Escola Estadual Professor Elídio Duque; realizou o ensino médio concomitantemente ao curso Técnico em Agropecuária na Escola Agrotécnica Federal de Salinas.

Em 2006 ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, colando grau em janeiro de 2011.

Em março de 2011, iniciou o programa de pós-graduação em Ciência Florestal, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo os requisitos necessários à obtenção do título de *Magister Scientiae* em fevereiro de 2013.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1. Aglomerados.....	4
3.1.1. Matéria-Prima	4
3.1.2. Adesivos.....	5
3.1.3. Processamento.....	6
3.2. Utilização de resíduos.....	7
3.3. Tratamento térmico.....	10
3.3.1. Modificações químicas na madeira	11
3.3.2. Molhabilidade	12
3.3.3. Utilização do tratamento térmico na produção de painéis	13
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4.1. Preparo das partículas.....	16
4.2. Tratamento térmico.....	16
4.3. Propriedades das partículas	17
4.4. Produção dos painéis	18
4.5. Ensaio Físicos e Mecânicos.....	19
4.6. Molhabilidade.....	20
4.6. Delineamento experimental	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1. Propriedades das partículas	22
5.1.1. Análise química	22
5.1.2. Umidade de equilíbrio higroscópico, perda de massa e densidade básica.....	23
5.1.3. Análise termogravimétrica (TGA)	25
5.1.4. Dimensões das partículas	27

5.2. Efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas dos painéis	28
5.2.1. Densidade aparente	28
5.2.2. Teor de umidade	29
5.2.3. Adsorção de vapor d'água	30
5.2.4. Expansão Linear.....	31
5.2.5. Absorção de água	32
5.2.6. Inchamento em espessura após imersão em água	35
5.3. Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas dos painéis	37
5.3.1. Tração perpendicular.....	37
5.3.2. Arrancamento de parafuso	39
5.3.3. Dureza Janka	40
5.3.4. Compressão longitudinal	40
5.3.5. Resistência à flexão estática	41
5.3.5.1. Módulo de ruptura (MOR)	41
5.3.5.2. Módulo de elasticidade (MOE).....	42
5.3. Molhabilidade.....	44
5.4. Efeito do tipo de adesivo e da adição de parafina nas propriedades dos painéis	45
5.5. Comparação entre as diferentes condições do tratamento térmico e os tratamentos adicionais.....	50
5.6. Consumo energético do torrificador rotatório.....	58
6. CONCLUSÕES.....	59
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

RESUMO

ANDRADE, Paulo Ivan Lima de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2013. **Painéis de partículas termorretificadas produzidos com resíduos de madeira de *Pinus* proveniente de embalagens.** Orientador: Benedito Rocha Vital. Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

A indústria de painéis de madeira reconstituída ocupa uma posição estratégica no mercado, devido à possibilidade de serem utilizados resíduos como matéria-prima. Entretanto, a elevada instabilidade dimensional deste tipo de painel é um problema que limita a sua utilização. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do tratamento térmico nas propriedades de painéis de partículas produzidos com resíduos de madeira de *Pinus sp.*, provenientes de embalagens. Foi utilizado o adesivo a base de uréia-formaldeído, na concentração de 8%. O experimento foi desenvolvido em um fatorial 4x3x3, sendo 4 proporções de partículas termorretificadas adicionadas aos painéis (25, 50, 75 e 100%), 3 temperaturas de tratamento térmico (180, 200 e 220°C) e 3 repetições, totalizando 36 painéis. Para comparações, foram produzidos mais 9 painéis utilizando partículas sem tratamento térmico, com as seguintes variações na formulação adesiva: 1) Uréia-formaldeído (UF); 2) Uréia-formaldeído com adição de parafina (UF+P); 3) Fenol-formaldeído (FF), totalizando 45 painéis. Os ensaios físicos e mecânicos foram realizados de acordo com a norma da ABNT/NBR 14810-3 (2002). Os resultados foram comparados com a referida norma e com as normas ANSI/A-208.1 (1993) e DIN 68 761 (1) – 1961 (SANTANA e PASTORE, 1981). De modo geral, a adição de partículas termorretificadas melhorou a estabilidade dimensional dos painéis, porém, reduziu suas propriedades mecânicas. A utilização do adesivo a base de fenol-formaldeído ou da parafina melhorou a estabilidade dimensional dos painéis. Painéis produzidos apenas com partículas termorretificadas apresentaram menor teor de umidade de equilíbrio higroscópico, adsorção de vapor d'água e inchamento em espessura do que painéis fabricados com o adesivo a base de uréia-formaldeído mais parafina. Painéis produzidos apenas com partículas termorretificadas apresentaram menor teor de umidade de

equilíbrio higroscópico e adsorção de vapor d'água do que aqueles fabricados com o adesivo a base de fenol-formaldeído.

ABSTRACT

ANDRADE, Paulo Ivan Lima de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, february, 2013. **Particleboard produced with heat-treated particles from Pine wood waste used for packing.** Adviser: Benedito Rocha Vital. Co-adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

The industry of wood based panels occupies a strategic position in the market due to the possibility of using wood waste as raw material. However, the high dimensional instability of this type of panel is a problem that causes limitation to their use. The aim of this study was to evaluate the effect of heat treatment on properties of particleboards produced with wood waste of *Pinus sp.*, used for packing. Adhesive of urea-formaldehyde at a concentration of 8% was used. The panels were produced with 4 proportions of particles heat-treated (25, 50, 75 and 100%), at 3 levels of temperatures of heat treatment (180, 200 and 220 ° C) and 3 repetitions were conducted, totalizing 36 panels. For comparison, 9 panels were made by using particles without heat treatment, with the following variations in the adhesive formulation 1) Urea-formaldehyde (UF); 2) Urea-formaldehyde adding paraffin (UF + P); 3) Phenol-formaldehyde (FF), totalizing 45 panels. The physical and mechanical tests were performed according to the ABNT/NBR 14810-3 (2002) norm. The results were compared with to the standard and norms ANSI/A-208.1 (1993) and DIN 68 761 (1) - 1961 (SANTANA and PASTORE, 1981). In general, the addition of heat-treated particles improved the dimensional stability of the panels, however, it reduced their mechanical properties. The use of the adhesive phenol-formaldehyde or paraffin improved the dimensional stability of the panels. Panels produced only with heat-treated particles showed lower moisture content of hygroscopic equilibrium, adsorption of water steam and thickness swelling than panels manufactured with the adhesive of urea-formaldehyde more paraffin. Panels produced only with heat-treated particles showed lower moisture content of hygroscopic equilibrium and adsorption of water steam than those manufactured with the adhesive based phenol-formaldehyde.

1. INTRODUÇÃO

Os painéis de madeira reconstituída são amplamente empregados na indústria de móveis, construção civil, entre outros. Foram desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial na Alemanha, devido aos problemas de escassez de madeira de boa qualidade para produção de painéis compensados.

Devido ao fato da madeira ser transformada em partículas para a produção destes painéis, a exigência em termos de qualidade da matéria prima não é tão grande. Desta maneira, resíduos de madeira provenientes de serrarias, laminadoras, construção civil, embalagens e outras fontes diversas podem ser empregados na produção deste tipo de painel (IWAKIRI et al., 2000; MENDOZA, 2010).

A utilização de resíduos pode representar para a indústria de painéis de madeira reconstituída uma redução no custo com a matéria prima. Desta maneira, maiores investimentos poderiam ser direcionados à melhoria de da estabilidade dimensional destes painéis, que geralmente apresentam alta absorção de água e inchamento em espessura. Em parte, estes problemas ocorrem devido ao principal adesivo utilizado, uréia-formaldeído, que apresenta baixa resistência à umidade. Entretanto, propriedades como geometria das partículas, densidade e higroscopicidade da madeira também refletem significativamente na qualidade de um painel de partículas.

O tratamento térmico da madeira é uma alternativa promissora na melhoria das suas propriedades tecnológicas. A ação da temperatura garante, dentre outras vantagens, um produto com maior estabilidade dimensional e resistência à degradação biológica. Este princípio também é válido para os painéis de madeira reconstituída, que poderiam apresentar melhor desempenho em ambientes com alta umidade.

A possibilidade de utilizar resíduos como matéria-prima reporta a indústria de painéis de madeira reconstituída uma posição estratégica no cenário geopolítico, uma vez que as políticas públicas no Brasil e no mundo tem se desenvolvido no sentido de reduzir, reutilizar e reciclar aquilo que é descartado como resíduo. Como exemplo disso, pode-se citar a aprovação da Lei nº 12.305/10, onde fica instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos,

que, dentre outras coisas, trata da responsabilidade das fontes geradoras sobre a destinação correta dos resíduos produzidos.

Aliado a este fato, a utilização do tratamento térmico na melhoria das propriedades tecnológicas dos painéis é um processo físico, o que é muito importante do ponto de vista ambiental, pois não envolve a manipulação de produtos químicos tóxicos a saúde humana.

Atualmente, tem-se buscado o desenvolvimento de tecnologias economicamente viáveis para realização do tratamento térmico na indústria de painéis de madeira reconstituída. Desta maneira, o foco da pesquisa é desenvolver processos que melhorem a estabilidade dimensional dos painéis sem, no entanto, onerar demasiadamente o custo de produção. A utilização de condições que permitam a realização do tratamento térmico em um menor tempo, por exemplo, tem sido bastante discutida.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o efeito do tratamento térmico nas propriedades de painéis de partículas, produzidos com madeira proveniente de resíduos de embalagens de *Pinus sp.*

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o efeito da temperatura do tratamento térmico nas propriedades das partículas e dos painéis;
- Avaliar o efeito da proporção de partículas termorretificadas adicionadas aos painéis nas propriedades físicas e mecânicas dos mesmos;
- Avaliar o efeito da adição de parafina e da utilização do adesivo à base de fenol-formaldeído nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis;
- Comparar o efeito do adesivo com o efeito do tratamento térmico nas propriedades dos painéis;
- Obter o consumo energético para realização do tratamento térmico utilizando um torrificador rotatório, com aquecimento a GLP (Gás Liquefeito de Petróleo);
- Avaliar a viabilidade da reutilização de resíduos de embalagens de madeira na produção de painéis de partículas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Aglomerados

Segundo Moslemi (1974), o aglomerado é conceitualmente definido como um painel produzido através da aglutinação de pequenas partículas de madeira ou outro material lignocelulósico, de maneira a reordenar as partículas, incorporando-se adesivos sintéticos e prensando com a aplicação de calor por um determinado tempo. O painel acabado apresenta uniformidade no seu plano e a resina sintética serve de aglutinante das partículas.

Os primeiros projetos utilizando aglomerado são datados de 1908 -1910. Em 1950 o seu desenvolvimento ocorreu simultaneamente nos Estados Unidos e Alemanha com a idéia de aproveitamento de resíduos de serraria e laminação. A aceitação deste produto foi tamanha que, no início da década de 80, o volume de produção equivaleu-se ao do compensado (PEREYRA, 1993).

De acordo com Zugman (1994), as indústrias de painéis reconstituídos à base de partículas atualmente se encontram entre as maiores indústrias de processamento de madeira e seu grande êxito se deve principalmente a dois fatores:

- Os painéis são produtos que envolvem a agregação de alta tecnologia, apresentando, em contrapartida, preço relativamente baixo, produto de boa qualidade e alta relação custo/desempenho;
- O processo de produção pode envolver a utilização de resíduos florestais e industriais, material de reduzido diâmetro e uma gama variada de matérias-primas.

3.1.1. Matéria-Prima

Segundo Iwakiri (2005), diversos parâmetros da madeira destinada a produção de painéis reconstituídos devem ser levados em consideração, tais como as propriedades anatômicas, densidade, teor de extrativos, pH, etc. Destas, a densidade é a propriedade que fornece um maior número de informações relevantes ao processo.

Em geral, a madeira empregada nas indústrias de painéis reconstituídos apresenta densidade entre 0,40 a 0,60 g/cm³. Para espécies com densidade fora deste intervalo é recomendada uma mistura em proporções adequadas com outras madeiras, de modo a obter a densidade final desejada (VITAL et al., 1974).

Existe uma relação marcante entre a densidade do painel e a densidade da madeira, denominada razão de compactação. Este parâmetro interfere significativamente nas propriedades dos painéis de madeira reconstituída, pois representa o grau de densificação do material para a consolidação do painel. A utilização de madeiras de baixa densidade resulta em chapas de alta razão de compactação e maior área de contato entre as partículas, resultando em melhores propriedades de flexão estática e ligação interna (MOSLEMI, 1974; MALONEY, 1993).

3.1.2. Adesivos

Os adesivos utilizados na produção de painéis de madeira reconstituída podem ser de origem orgânica ou inorgânica. Os orgânicos são sintetizados a partir do petróleo, dentre os quais se destacam a uréia-formaldeído, fenol-formaldeído e melamina-formaldeído. Os inorgânicos geralmente são à base de silicatos, sendo empregados principalmente na colagem de vidros e metais. Entretanto, nos últimos anos estão sendo estudados como alternativa para colagem de madeira e derivados.

Dentre as teorias existentes para explicar o fenômeno da adesão, duas se aplicam a madeira: enganchamento mecânico e adsorção. Segundo a teoria do enganchamento mecânico, a penetração do adesivo num substrato poroso leva à formação de ganchos que se prendem nas camadas superficiais da madeira após a cura e endurecimento do adesivo. A teoria da adsorção estabelece que a adesão é resultante do contato molecular entre dois materiais que desenvolvem forças de atração superficiais (GALEMBECK e GANDUR, 2001).

Segundo Maloney (1993), 90% dos painéis de madeira reconstituída no mundo são produzidos utilizando adesivos à base de fenol-formaldeído e de uréia-formaldeído. A uréia-formaldeído é um adesivo para interiores (sem contato com umidade), com boas propriedades de colagem, coloração clara, não inflamável, cura tanto a frio (com catalisador ácido) como a quente e

apresenta baixo custo em comparação com outros adesivos. Apresenta como desvantagens a baixa resistência à água e à temperatura, bem como a emissão de formaldeído, elemento de alta toxicidade ao ser humano.

Adesivos como fenol-formaldeído e isociano (MDI) são empregados na produção de painéis estruturais, como os OSB – *oriented strand board*, que requerem maior resistência mecânica e alta resistência à umidade (IWAKIRI et al., 2008).

3.1.3. Processamento

A redução da madeira em partículas se faz de acordo com o produto final. Na Tabela 1 são apresentados os principais tipos de painéis reconstituídos e as características das partículas utilizadas.

Tabela 1. Principais tipos de painéis reconstituídos de acordo com a partícula utilizada

Partícula utilizada	Dimensões das partículas (polegadas)			Tipo de painel
	Comprimento	Largura	Espessura	
Wafer	1,0 – 3,0	1,0 – 3,0	0,025 – 0,05	Waferboard
Flake	0,5 – 3,0	0,5 – 3,0	0,010 – 0,025	Flakeboard
Strand	0,5 – 3,0	0,25 – 1,0	0,010 – 0,025	OSB
Sliver	0,25 – 3,0	0,005 – 0,025	0,005 – 0,025	Sliverboard
Partícula	0,05 – 0,5	0,005 – 0,05	0,005 – 0,05	Aglomerado

Fonte: IWAKIRI, 2005.

A geometria das partículas é um parâmetro importante no processo de produção de painéis de madeira reconstituída. A relação entre o comprimento e a espessura das partículas define o coeficiente de esbeltez. Partículas com baixos coeficientes de esbeltez possuem uma pequena superfície específica, o que remete a uma grande quantidade de adesivo por unidade de área, resultando em um painel com maior resistência a tração perpendicular. Por outro lado, partículas com elevados coeficientes resultam em painéis com maior resistência à flexão e estabilidade dimensional (MOSLEMI, 1974; VITAL et al., 1992).

Existem diversos equipamentos no mercado para processar a madeira em partículas, tais como os picadores, que transformam toras e resíduos de indústrias madeireiras em cavacos e os moinhos, que reduzem os cavacos a partículas (MALONEY, 1993).

Após preparadas, as partículas devem ser secas até atingirem um teor de umidade na faixa de 2% a 7%. Este é um ponto crucial na produção de painéis, pois durante a operação de prensagem a quente, altos teores de umidade podem ocasionar a delaminação ou “estouro” da chapa, no momento de abertura dos pratos da prensa (YOUNGQUIST, 1999).

Durante a prensagem ocorre a transferência do calor necessário para a cura do adesivo. Neste momento, são determinadas a espessura e a densidade do painel. Existem alguns fatores importantes a serem considerados no processo de prensagem, que determinarão a qualidade final do painel e o rendimento do processo:

- **Tempo de fechamento da prensa:** tempo de compressão das partículas, desde o contato dos pratos da prensa com o material, até atingir a espessura desejada (MATOS, 1988).
- **Tempo de prensagem:** intervalo entre o momento em que o colchão é comprimido, atingindo a espessura final da chapa, até o momento de abertura dos pratos da prensa (SILVA, 2000)
- **Temperatura da prensa:** atua na aceleração da polimerização do adesivo e na plasticização da madeira (MATOS, 1988).
- **Pressão:** consolidação do colchão na espessura final desejada e o contato adequado entre as partículas (MENDES, 2002).

3.2. Utilização de resíduos

O aproveitamento de resíduos tem sido pauta de discussões políticas em todo o mundo, na busca de uma instrumentação legal que venha regulamentar as atividades das fontes geradoras. No Brasil, foi criada Política Nacional de Resíduos Sólidos, através da Lei nº 12.305/2010, que tem como principal instrumento o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Dentre outras questões, o conteúdo deste plano aborda a situação atual dos resíduos sólidos no país, bem como metas de redução, reutilização e reciclagem.

A indústria de painéis de madeira reconstituída surgiu na Europa com intuito de aproveitar resíduos, devido à escassez de madeira sólida. Apesar disso, no Brasil, a principal matéria-prima empregada na produção destes painéis é oriunda de florestas plantadas (ROQUE e VALENÇA, 1998).

Em princípio, qualquer material lignocelulósico pode ser utilizado na produção de painéis de madeira reconstituída. Entretanto, o aproveitamento de resíduos é limitado pela heterogeneidade do material. Uma madeireira, por exemplo, produz diferentes tipos de resíduos e em quantidades variáveis ao longo do tempo, o que compromete a padronização do processo de produção do painel.

Em muitos países, a principal limitação no reaproveitamento de resíduos de madeira para produção de painéis reconstituídos é a falta de infra-estrutura para coletar, processar e descontaminar o material. Muitas das fontes de resíduos possuem contaminantes como pedras, concreto, metais, plásticos, tintas, borracha, etc. Apesar de existirem sofisticados sistemas de purificação dos resíduos, estes apresentam um custo elevado. Outra limitação existente é a competição por este recurso com o setor energético (IRLE e BARBU, 2010).

Na indústria madeireira, os resíduos são produzidos em diversas etapas do processo, que vão desde a extração florestal, passando pelo processamento, beneficiamento até chegar ao pós-consumo.

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável – ABIB (2012) tem-se uma perda anual de aproximadamente 11 milhões de m³ de resíduos na extração florestal. Já no processamento, considerando as indústrias de madeira serrada, painéis compensados e MDF, este valor sobe para mais de 64 milhões de m³.

Em se tratando dos resíduos de pós-consumo, pode-se citar o descarte de móveis danificados, estruturas de madeira temporárias empregadas na construção civil e embalagens, por exemplo.

As embalagens de madeira são utilizadas para o transporte de produtos que necessitam de maior cuidado, devido a maior resistência mecânica que apresentam. Enquadram-se na categoria de embalagens de madeira os *pallets*, caixas, barris de madeira, tambores, carretéis e engradados (ABIMCI, 2004).

Os *pallets* são plataformas destinadas a suportar cargas, facilitando a mecanização das operações por meio de empilhadeiras. São adotados universalmente para o transporte e armazenamento de mercadorias. Já as

caixas são embalagens com faces inteiriças, retangulares ou poligonais feitas com os mais diversos materiais para variadas finalidades. Podem ser confeccionadas com madeira maciça, compensados e painéis reconstituídos (ABIMCI, 2004).

Segundo informações da Associação Brasileira de Embalagens – ABRE (2012), 1,8% do total de embalagens produzidas no Brasil são de madeira, o que corresponde a uma produção anual de quase 340 milhões de unidades. Além disso, devem ser considerados também os *pallets*, cuja produção anual ultrapassa 500 milhões de unidades (IBGE, 2010).

Quando não há a possibilidade de recuperação, as embalagens de madeira recebem os seguintes destinos: (1) processamento em cavaco para fins energéticos, (2) confecção de peças artesanais ou uso energético sem processo intermediário de transformação, e (3) aterro sanitário (WIECHETECK, 2009).

Em outras partes do mundo os resíduos de embalagens de madeira já são reutilizados de forma expressiva. No Reino Unido, cerca de 1 milhão de toneladas de embalagens de madeira foram descartadas em 2010. Deste total, cerca de 75 % foram recicladas (DEFRA, 2012).

Nos EUA, as embalagens de madeira (caixas e *pallets*) constituíram 4,3% dos resíduos sólidos urbanos gerados em 2008. Embora não pareça significativo, isso correspondeu a mais de 10 milhões de toneladas de embalagens de madeira descartadas naquele ano. Deste total, 14,8% foi reciclado (EPA, 2009).

O Brasil ainda carece de informações globais quanto aos resíduos produzidos pelo setor de embalagens de madeira. Entretanto, existem as chamadas Bolsas de Resíduos, nas quais são disponibilizadas informações sobre oferta e procura de resíduos dos mais diversos tipos, inclusive madeireiros (FONSECA et al., 1998).

O Sistema Integrado de Bolsa de Resíduos é composto por indústrias de vários estados do Brasil. É patrocinado pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) e conta com apoio das Federações das Indústrias da Bahia, Goiás, Minas Gerais, Pará, Paraná, Pernambuco e Sergipe (SIBR, 2012).

Também existem alguns estudos localizados buscando estimar o descarte de resíduos de madeira em nível de município. Segundo informações do Serviço Municipal de Saneamento Ambiental de Santo André – SEMASA

(2005), o Aterro Municipal recebe mensalmente 900 m³ de madeiras diversas e móveis usados. Os resíduos dos grandes geradores, como *pallets*, caixas e caixotes de madeira representam um potencial nunca explorado ou mensurado. Neste município, essas empresas pagam a particulares para destinar adequadamente esses resíduos a aterros privados, e já têm manifestado interesse em doá-los a Cooperativas.

3.3. Tratamento térmico

Apesar das excelentes propriedades tecnológicas da madeira para os mais diversos fins, características como higroscopicidade, instabilidade dimensional e degradação biológica ainda são fatores limitantes para um desempenho satisfatório deste material. Diversos tratamentos podem ser aplicados para melhorar estas propriedades da madeira, dentre os quais se destaca o tratamento térmico, método já bastante difundido, prático e econômico (ARAÚJO et al., 2012).

Muitos estudos têm sido realizados no Brasil e no mundo com intuito de avaliar o efeito do tratamento térmico nas propriedades da madeira e derivados. Em se tratando de madeira sólida, pode-se afirmar que o tratamento térmico é uma técnica capaz de reduzir a higroscopicidade, melhorando a estabilidade dimensional, além de aumentar a durabilidade natural (STAMM et al., 1946; HAKKOU et al., 2006; ARAÚJO et al., 2012).

No entanto, a degradação térmica dos constituintes da madeira resulta em uma perda de massa, que pode diminuir sua resistência mecânica (KAMDEM et al., 2002; SUNDQVIST et al. 2006). Entretanto, dependendo das condições em que o tratamento térmico é realizado, algumas propriedades mecânicas podem ser melhoradas, especialmente quando se utiliza uma atmosfera inerte (ARAÚJO et al., 2012).

Na Europa, a madeira tratada termicamente é produzida em escala industrial desde o ano 2000. No Brasil, já existem empresas produzindo e comercializando madeiras termorretificadas de pinus, eucalipto e teca. As diferentes tecnologias utilizadas para realização do tratamento térmico apresentam variações quanto ao teor de umidade inicial da madeira, temperatura, características da atmosfera (oxidante ou inerte, seca ou úmida e utilização de óleos) e aplicação de pressão (TWBRAZIL, 2010).

3.3.1. Modificações químicas na madeira

O aquecimento da madeira promove modificações químicas diferenciadas nos seus constituintes fundamentais, a saber, celulose, hemiceluloses e lignina. O tratamento térmico consiste então na aplicação de calor suficiente para promover as modificações químicas e físicas desejáveis na madeira, sem, no entanto, atingir níveis de degradação muito elevados, que venham comprometer o uso do produto final.

O tratamento térmico da madeira compreende uma faixa de temperatura entre 160 e 220°C (WINDEISEN et al., 2007). Entretanto, além da temperatura, outros fatores como o tempo de exposição, as características da atmosfera e as dimensões das peças determinam o efeito final do tratamento térmico nas propriedades da madeira (ESTEVES e PEREIRA, 2009). Devido a estes fatores, as temperaturas associadas à degradação dos constituintes da madeira são bastante divergentes.

Conforme Byrne e Nagle (1997), a madeira começa a ser degradada a temperaturas próximas de 200°C, com o início da decomposição das hemiceluloses, componentes que mais contribuem para a higroscopicidade da madeira por apresentarem uma elevada quantidade de grupamentos hidroxílicos e uma estrutura completamente amorfa. Entretanto, são estas características as tornam mais susceptíveis à degradação térmica (PAUL e OHLMEYER, 2010).

De acordo com Nuopponen et al. (2005), a degradação térmica das hemiceluloses inicia-se com reações de desacetilação, gerando como subproduto o ácido acético, que atua na despolimerização destes polissacarídeos através da hidrólise ácida. Mitchell et al. (1953) afirmam que a catálise ácida pode ser ainda mais favorecida quando o tratamento térmico é realizado em ambientes fechados, devido à manutenção do ácido acético em contato com a madeira por mais tempo. Furfural e hidroximetilfurfural são formados a partir da degradação das pentoses e hexoses, respectivamente.

Com a degradação das hemiceluloses, a quantidade de grupamentos hidroxílicos é substancialmente reduzida, afetando diretamente a higroscopicidade da madeira.

A celulose é muito mais resistente à degradação térmica que as hemiceluloses devido à natureza cristalina deste polissacarídeo. Entretanto,

alguns autores afirmam que a ação do calor pode causar a degradação das regiões amorfas da celulose, resultando em um aumento no grau de cristalinidade, diminuindo a exposição dos grupamentos hidroxílicos às moléculas de água (WIKBERG e MAUNU, 2004; ESTEVES et al. 2008a; PAUL e OHLMEYER, 2010).

Por outro lado, Bourgois e Guyonnet (1988) verificaram que o tratamento da madeira de pinus numa atmosfera sem oxigênio, a 260°C, não alterou significativamente cristalinidade da celulose. Já Pereira (2013) verificou uma redução no grau de cristalinidade de partículas *strand* de madeira de eucalipto quando estas foram submetidas ao tratamento térmico nas temperaturas de 180, 200 e 220°C.

A lignina é o constituinte da madeira mais resistente à degradação térmica. Apesar disso, temperaturas inferiores a 200°C já são suficientes para promoverem modificações em sua estrutura, porém em um menor grau que nos polissacarídeos. Isso pode ser constatado a partir do aumento da concentração de grupamentos OH fenólicos livres na madeira submetida ao tratamento térmico (WINDEISEN et al., 2007; ESTEVES et al. 2008a).

Entre 120 e 220°C, algumas unidades não condensadas da lignina se transformam em unidades do tipo difenilmetano, com variação de cor, reatividade e dissolução. Temperaturas acima de 200°C promovem a clivagem das ligações éter β -aril. Com a liberação dos sítios dos anéis aromáticos, em decorrência da desmetoxilação, ocorre um aumento do grau de condensação da lignina devido à formação de ligações metilênicas conectando os anéis aromáticos. Estas reações promovem um aumento das ligações C=C e uma diminuição de grupamentos OH, tornando a lignina mais hidrofóbica (ARAÚJO et al., 2012; TJEERDSMA e MILITZ, 2005; BROSSE et al., 2010).

3.3.2. Molhabilidade

Segundo Jennings (2003), o termo molhabilidade refere-se à interação entre um líquido e uma determinada superfície, sendo que superfícies com baixa energia livre promovem uma grande atração entre as moléculas do líquido, o que resulta em um grande ângulo de contato. Por outro lado, uma superfície com alta energia livre exerce uma maior atração das moléculas do líquido, resultando em um pequeno ângulo de contato.

O ângulo de contato (Figura 1), definido entre a superfície da madeira e a linha tangente à interface ar-sólido-líquido, é uma medida comumente utilizada para expressar a molhabilidade de superfícies.



Figura 1. Esquema do ângulo de contato formado pelo líquido sobre a superfície da madeira.
Fonte: CÉSAR, 2011.

Há evidências de que o tratamento térmico possa afetar a molhabilidade da madeira, interferindo nos processos de colagem, acabamento, tratamentos preservativos, dentre outros. Soares et al. (2011) verificaram uma tendência de redução da molhabilidade em amostras de *Araucaria angustifolia* e *Pinus elliottii* tratadas termicamente entre 100 e 200°C. Resultados semelhantes foram constatados por Pétrissans et al. (2003) e Kocaefer et al. (2008). Segundo Hakkou et al. (2005), a madeira tem sua molhabilidade reduzida após o tratamento térmico devido a ocorrência de modificações estruturais nos constituintes da parede celular, em função da plasticização da lignina.

3.3.3. Utilização do tratamento térmico na produção de painéis

Para painéis de madeira reconstituída, o tratamento térmico também tem se mostrado como uma técnica promissora na melhoria da estabilidade dimensional. Basicamente, os tratamentos térmicos existentes para painéis são:

- 1) Pré-tratamento térmico das partículas utilizando vapor;
- 2) Pré-tratamento térmico das partículas a seco;
- 3) Injeção de vapor durante a termoprensagem;
- 4) Pós-tratamento térmico dos painéis.

Devido à taxa de hidrólise dos componentes químicos fundamentais da madeira ser acelerada pela temperatura e pressão, a maioria dos tratamentos térmicos são realizados sob condições de alta pressão e umidade. Sendo assim, as pesquisas se concentram em processos de pré-tratamento das partículas com vapor, onde são aplicadas pressões entre 5 e 10 bar, com temperaturas entre 160°C a pouco mais de 200°C (PAUL e OHLMEYER, 2010).

Boonstra et al. (2006) avaliaram o efeito do pré-tratamento térmico de partículas de *Picea abies* e *Pinus sylvestris* sobre as propriedades de painéis de madeira reconstituída, utilizando vapor sob alta pressão num primeiro estágio e, posteriormente, aquecimento a 180°C em atmosfera de N₂. Houve redução na umidade de equilíbrio higroscópico, absorção de água e inchamento em espessura. Entretanto, a ligação interna dos painéis também foi reduzida, devido à inativação parcial da superfície das partículas. Todavia, a pré-molhagem das partículas num primeiro estágio resultou em painéis com melhor ligação interna.

Tomek (1966 apud PAUL e OHLMEYER, 2010) foi o primeiro a discutir a possibilidade de se utilizar um processo a seco para modificar partículas de madeira, através de um secador estático aquecido. Apesar de ter obtido resultados satisfatórios, fazia-se necessário espalhar as partículas em uma camada de espessura uniforme, a fim de obter uma distribuição homogênea da temperatura. Na indústria, este requisito é difícil de ser cumprido.

Investigações utilizando um secador rotativo (escala laboratorial) têm apresentado maior potencial de uso pela indústria, pois permitem efetuar o tratamento térmico de maiores quantidades de partículas (PAUL et al., 2006). Os mesmos autores verificaram que o pré-tratamento térmico de partículas do tipo *strand* reduziu o inchamento em espessura dos painéis do tipo OSB sem afetar a ligação interna.

A injeção de vapor simultânea a termoprensagem tem como objetivo a otimização do processo de produção do painel, através da redução do tempo

necessário para atingir a temperatura de cura do adesivo na linha central (SHEN, 1973; GEIMER, 1982). Entretanto, a depender das condições em que o procedimento é realizado, podem ser promovidas modificações térmicas nos painéis produzidos.

A utilização de uma prensa hidráulica aquecida é uma maneira de se promoverem modificações térmicas nos painéis após a prensagem. Medved (2010) verificou que painéis de madeira reconstituída tratados termicamente desta maneira tiveram uma redução no inchamento em espessura. O autor concluiu que o aumento da temperatura e do tempo de exposição melhoraram a estabilidade dimensional. Entretanto, de acordo com Boonstra et al. (2006), o encolhimento das partículas de madeira em decorrência do tratamento térmico pode afetar a ligação interna dos painéis tratados desta forma.

Mendes (2010) comparou o efeito do pré-tratamento de partículas de *Pinus taeda* em estufa com o do pós-tratamento dos painéis em uma prensa aquecida na produção de painéis do tipo OSB, utilizando temperaturas entre 200 e 240°C. O autor verificou que o pré-tratamento teve um efeito mais pronunciado sobre as propriedades dos painéis do que o pós-tratamento. Verificou-se que maiores temperaturas resultaram em melhor estabilidade dimensional e redução nas propriedades mecânicas.

Segundo Paul et al. (2006), uma das vantagens de se realizar o pré-tratamento das partículas em vez do pós-tratamento do painel é a redução do tempo necessário para efetuar o processo, uma vez que as partículas possuem dimensões reduzidas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Preparo das partículas

Para a produção das partículas foram utilizados resíduos madeireiros provenientes de embalagens do tipo caixas, que são constituídas por painéis compensados e madeira sólida de *Pinus sp.*

As caixas foram desmontadas removendo-se os pregos e grampos. Em seguida, o material foi cortado com uma serra circular em dimensões adequadas para ser processado em um picador de cavacos. Posteriormente, os cavacos foram reduzidos a partículas em um moinho de martelo, equipado com peneira de 2 x 22,5 mm. Em seguida, as partículas passaram por um peneiramento manual em peneiras com malha de 2,5 mm, recolhendo-se a fração retida nesta malha.

A composição das partículas para produção dos painéis foi de aproximadamente 50% de compensado e 50% de madeira sólida.

4.2. Tratamento térmico

As partículas foram tratadas termicamente nas temperaturas de 180, 200 e 220°C, durante 15 minutos depois de atingida a temperatura desejada. O tempo médio para realização do tratamento térmico foi de 70 minutos, sendo gastos 55 minutos para atingir a temperatura desejada mais 15 minutos de tratamento efetivo.

O tratamento térmico foi realizado em um torrificador rotatório com aquecimento a gás (GLP). O equipamento consiste de um cilindro com 70 cm de comprimento e 48 cm de diâmetro, com uma capacidade de 125 litros e que gira a 11 RPM, acionado por um motor elétrico. O aquecimento é feito por meio de um queimador localizado abaixo do cilindro. A temperatura foi monitorada através de um termômetro analógico localizado em uma das laterais do cilindro e controlada regulando-se a entrada de gás.

Foi determinado o consumo de GLP do torrificador pesando-se os botijões antes e depois do tratamento térmico.

4.3. Propriedades das partículas

A umidade de equilíbrio higroscópico (UEH), densidade básica, perda de massa, coeficiente de esbeltez, análise termogravimétrica (TGA) e composição química das partículas termorretrificadas e não tratadas (testemunha) foram determinadas empregando-se os seguintes procedimentos:

- ✓ Umidade de equilíbrio higroscópico (UEH): Determinada nas condições de temperatura de $20 \pm 3^\circ \text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa, sete dias após o realizado o tratamento térmico.
- ✓ Densidade básica: Metodologia proposta por Vital (1984).
- ✓ Perda de massa: As partículas foram pesadas antes e depois do tratamento térmico, descontando-se o teor de umidade após o equilíbrio.
- ✓ Dimensões das partículas: Utilizando-se um paquímetro, foram medidos o comprimento e a espessura de aproximadamente 100 partículas, determinando-se a razão entre estas dimensões (Coeficiente de esbeltez).
- ✓ Análise termogravimétrica: Foi realizada com o equipamento DTG-60H da marca SHIMADZU, sob atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de $50 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. As partículas foram moídas e a serragem produzida foi selecionada em peneiras sobrepostas de malha de 200 e 270 mesh, sendo utilizada a fração retida nesta última. As amostras de aproximadamente 4 mg de serragem foram submetidas a um gradiente de temperatura variando de 25 a 600°C , com taxa de aquecimento de $10^\circ \text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Calculou-se a perda de massa nos intervalos de temperatura: $100\text{-}150^\circ \text{C}$, $150\text{-}200^\circ \text{C}$, $200\text{-}250^\circ \text{C}$, $250\text{-}300^\circ \text{C}$, $300\text{-}350^\circ \text{C}$, $350\text{-}400^\circ \text{C}$ e $400\text{-}450^\circ \text{C}$. A massa residual foi calculada na temperatura de 450°C .
- ✓ Composição química: Foram utilizadas amostras compostas, primeiramente transformadas em serragem em moinho tipo Wiley, conforme a norma TAPPI T 257 cm-02. As análises foram efetuadas na fração de serragem, classificadas em peneiras de 40/60 mesh, sendo determinados:
 - Teor de extrativos, de acordo com a norma TAPPI T 204 cm-97;
 - Lignina: Lignina insolúvel, determinada em duplicata pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por

Gomide e Demuner (1986). A lignina solúvel em ácido foi determinada a partir do filtrado resultante da análise da lignina Klason, através de leitura em espectrofotômetro, de acordo com Goldschimid (1971). O teor de lignina total foi obtido pela soma da lignina residual mais a lignina solúvel em ácido. O percentual de holocelulose foi obtido pelo somatório dos teores de extrativos e lignina totais, subtraído de 100.

4.4. Produção dos painéis

O teor de umidade das partículas foi ajustado para 3%. Os painéis foram produzidos nas dimensões de 40 x 40 x 1,5 cm, com densidade aparente desejada de 600 kg/m³.

Foi utilizado o adesivo a base de uréia-formaldeído, fornecido pela Momentive Química, na quantidade de 8% sobre a massa seca de partículas. Utilizou-se o catalisador sulfato de amônio, no teor de 1,5% sobre a quantidade de sólidos do adesivo.

As partículas termorretrificadas foram misturadas a partículas não tratadas, nas proporções de 25, 50, 75 e 100%. Para comparar a eficiência do tratamento térmico na melhoria da estabilidade dimensional, foram produzidos painéis utilizando partículas sem tratamento térmico, variando somente a formulação adesiva, sendo: 1) Uréia-formaldeído; 2) Uréia-formaldeído mais uma solução de parafina, na proporção de 0,5% sobre a massa seca de partículas; 3) Fenol-formaldeído, na proporção de 8%.

As propriedades dos adesivos utilizados estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades dos adesivos

Adesivo	Teor de sólidos (%)	pH	Viscosidade (cp)	Tempo de gelatinização 180°C (m:s)
Uréia-formaldeído	62,67	7,96	1076,67	00:48
Fenol-formaldeído	50,71	12,73	891,67	02:26

O adesivo e a parafina foram aplicados nas partículas empregando-se um encolador dotado de uma pistola pneumática. A prensagem foi realizada

em uma prensa mecânica de pratos planos a uma pressão de 32 kgf/cm² e na temperatura de 180°C, durante 8 minutos.

Depois da prensagem, os painéis foram acondicionados em uma caixa de madeira até atingir o equilíbrio. Em seguida, foram lixados e esquadrejados nas dimensões de 38 X 38 X 1,5 cm.

4.5. Ensaio Físicos e Mecânicos

Os painéis foram recortados para obtenção dos corpos de prova conforme a Figura 2. As propriedades dos painéis foram determinadas de acordo com a norma da ABNT/NBR 14810-3 (2002).

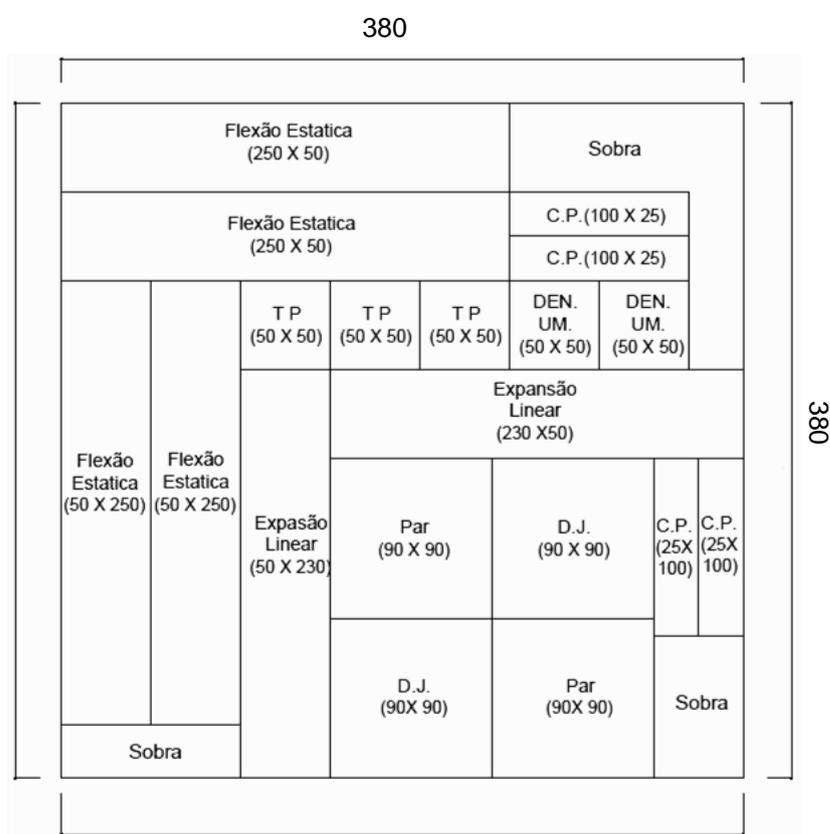


Figura 2. Representação da posição dos corpos de prova no painel.
Fonte: CABRAL, 2010.

Os corpos de prova foram climatizados até a umidade de equilíbrio em temperatura de 20 ± 3°C e 65 ± 5% de umidade relativa, utilizando-se uma câmara climática. Para o teste de expansão linear e adsorção de vapor d'água, os corpos-de-prova foram novamente climatizados até atingirem equilíbrio a uma temperatura de 20 ± 3°C e uma umidade relativa de 90 ± 5%.

Os resultados obtidos nos testes foram comparados com as normas ABNT/NBR 14810-2 (2002), ANSI/A – 208.1 (1993) e DIN 68 761 (1) – 1961 (SANTANA e PASTORE, 1981).

4.6. Molhabilidade

Avaliou-se a molhabilidade dos painéis, utilizando-se o adesivo a base de uréia-formaldeído. Para realização do teste, depositou-se uma gota de adesivo de aproximadamente 30 μL sobre a superfície da amostra, utilizando-se uma seringa com capacidade de 1 mL e graduada em intervalos de 10 μL , que foi posicionada a uma altura fixa de 8 mm.

Após um período de 2 minutos, obteve-se uma fotografia com dimensões 1280 (H) x 1024 (V) *pixels*, utilizando-se o software *Pixelink capture* e uma câmera *Pixelink*, modelo PL-A662, acoplada a uma lupa estereoscópica *ZEISS Stemi 2000-C*. O procedimento foi repetido 10 vezes para cada tratamento, sendo realizado em um ambiente com temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa.

Obtidas as fotografias, foi determinado o ângulo de contato entre o adesivo e a superfície das amostras (Figura 3), utilizando-se o software *AxioVision*.

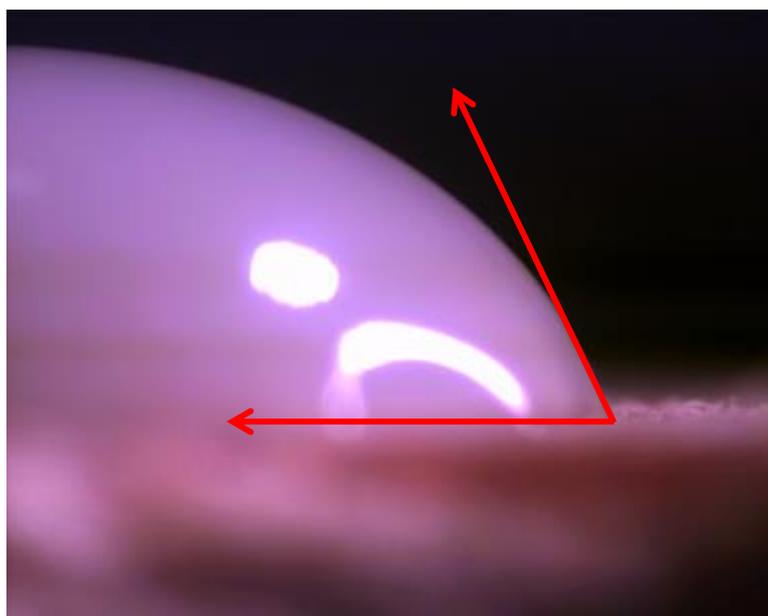


Figura 3. Fotografia da gota do adesivo a base de uréia-formaldeído depositada sobre a superfície do painel, demonstrando o ângulo de contato.

4.6. Delineamento experimental

O experimento foi analisado segundo um delineamento inteiramente casualizado – DIC em fatorial 4x3x3, sendo 4 proporções de partículas termorretificadas adicionadas aos painéis (25, 50, 75 e 100%), 3 temperaturas de tratamento (180, 200 e 220°C) e 3 repetições, totalizando 36 painéis. Para os painéis produzidos com partículas sem tratamento térmico (Tratamentos adicionais), foram utilizadas 3 formulações adesivas (Uréia-formaldeído, Uréia-formaldeído com adição de parafina e Fenol-formaldeído) e 3 repetições, totalizando 9 painéis. No total, foram produzidos 45 painéis.

Utilizando-se o programa estatístico SAEG, os dados foram submetidos à análise de variância, pelo teste F a 95% de significância. Quando estabelecidas diferenças significativas, as médias dos tratamentos adicionais foram comparadas entre si pelo teste de Tukey, a 95% de significância. Para comparar as médias dos painéis produzidos com partículas termorretificadas com os tratamentos adicionais utilizou-se o teste de Dunnett, a 95% de significância. Para comparar as médias dos painéis produzidos com partículas termorretificadas entre si, foi utilizado o teste de Tukey, a 95% de significância.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Propriedades das partículas

5.1.1. Análise química

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados da análise química das partículas de *Pinus sp.*, em função da temperatura de tratamento térmico.

Tabela 3. Valores médios de extrativos, lignina e holocelulose para as partículas de *Pinus sp.* em função da temperatura do tratamento térmico

Temperatura (°C)	Composição química (%)				
	Extrativos	Lignina insolúvel	Lignina solúvel	Lignina total	Holocelulose
Testemunha	2,83 B	29,44 C	0,24 A	29,68 C	67,48 A
180	3,02 B	32,02 BC	0,30 A	32,32 BC	64,65 AB
200	3,66 A	34,14 AB	0,30 A	34,44 AB	61,91 BC
220	3,87 A	37,42 A	0,35 A	37,77 A	58,37 C

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se que o teor de holocelulose reduziu com o aumento da temperatura. Isso se deve, principalmente, a susceptibilidade das hemiceluloses à degradação térmica, uma vez que estas apresentam uma estrutura amorfa e com elevada quantidade de grupamentos hidroxílicos.

Observa-se que, com a degradação dos polissacarídeos, houve uma concentração dos demais componentes. Partículas tratadas a 200 e 220°C apresentaram maior teor de extrativos e lignina que a testemunha.

A maioria dos extrativos originais da madeira é degradada ou volatilizada durante o tratamento térmico. Nuopponen et al. (2003) verificaram que todo o conteúdo de ceras e gorduras de baixa massa molecular foi evaporado quando a madeira foi submetida ao tratamento térmico na temperatura de 180°C.

Apesar disso, a degradação dos componentes estruturais da parede produz novos compostos extratáveis, conforme relatado por Esteves et al. (2011). Os autores verificaram um aumento na concentração de compostos fenólicos e açúcares de baixa massa molecular na madeira de *Pinus pinaster* tratada termicamente entre 190 e 200°C.

O aumento da concentração de lignina confirma o fato de que esta apresenta maior estabilidade térmica que os polissacarídeos, que começam a se degradar a temperaturas inferiores e a uma taxa mais elevada.

Esteves et al. (2011) verificaram que o tratamento térmico da madeira de *Pinus pinaster* chegou a reduzir em 45% e 15% os teores de xilose e manose, respectivamente, de em relação à composição original.

Mburu et al. (2008) observaram que, após 7 horas de tratamento térmico em estufa a 250°C, todo o conteúdo de xilose, galactose, ramnose e arabinose da madeira de *Grevillea robusta* foi degradado.

Todos estes autores verificaram um aumento no teor de lignina na madeira tratada termicamente.

5.1.2. Umidade de equilíbrio higroscópico, perda de massa e densidade básica

Os valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico (UEH), perda de massa e densidade básica das partículas estão apresentados na Tabela 4, em função da temperatura do tratamento térmico.

Tabela 4. Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico, perda de massa e densidade básica das partículas de *Pinus sp.* em função da temperatura do tratamento térmico

Temperatura (°C)	UEH (%)	Perda de massa (%)	Densidade básica (g/cm ³)
Testemunha	10,55 A	0,00 C	0,35 B
180	5,32 B	3,37 B	0,38 AB
200	4,55 C	5,24 B	0,41 A
220	3,39 D	10,56 A	0,41 A

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Observa-se que houve uma redução da umidade de equilíbrio à medida que se aumentou a temperatura de tratamento das partículas. Possivelmente, essa diminuição está associada à redução do número de grupamentos OH disponíveis para adsorção de água (PAUL et al., 2006; ARAÚJO et al., 2012).

A degradação das hemiceluloses é tida como a principal causa da redução da higroscopicidade da madeira tratada termicamente, devido à elevada presença de grupamentos hidroxílicos nestes componentes. Entretanto, a ocorrência de ligações cruzadas na lignina e a degradação das

regiões amorfas da celulose também podem ter contribuído para a redução da higroscopicidade (TJEERDSMA et al., 1998; BOONSTRA e TJEERDSMA, 2006).

A redução na umidade de equilíbrio das partículas possibilita, em princípio, a produção de painéis com maior estabilidade dimensional. Entretanto, a degradação dos grupos hidrofílicos OH pode dificultar a ação do adesivo na consolidação do painel, uma vez que a adesão química é resultante do contato entre os grupos hidroxílicos da madeira e as moléculas do adesivo.

Verifica-se que as perdas de massa das partículas tratadas a 180 e 200°C não diferiram entre si. No entanto, aos 220°C, a perda de massa foi de 10,56%, sendo significativamente superior às demais temperaturas.

Estes resultados diferem dos encontrados por Paul et al. (2006), que obtiveram perdas de massa máximas de 2% para as temperaturas de 180, 200 e 220°C, ao realizarem o tratamento térmico de partículas de *Pinus silvestris* do tipo strand, utilizando um secador rotatório em escala laboratorial. Entretanto, o processo foi realizado numa atmosfera com reduzido teor de oxigênio e as partículas entraram no equipamento com um teor de umidade de 4%. Desta maneira, as variáveis de processo utilizadas pelos autores contribuíram para uma menor perda de massa.

De acordo com Girard e Shah (1991), a madeira começa a sofrer degradação térmica a partir de 180 °C com a liberação de dióxido de carbono, ácido acético e alguns componentes fenólicos. Possivelmente, a perda de massa na faixa de temperatura avaliada neste trabalho se deve, em parte, à degradação térmica das hemiceluloses, que são os componentes estruturais mais sensíveis à degradação térmica, conforme pode-se observar na Tabela 3. Entretanto, há uma perda de massa significativa associada ao processo de tratamento térmico em si, que ocorre devido à abrasão das partículas com as paredes do torrificador, gerando um material de granulometria fina que permanece aderido ao interior do equipamento.

À exceção das partículas tratadas a 180°C, todas as demais apresentaram maior densidade que as partículas não tratadas. Possivelmente, houve uma contração volumétrica da madeira maior que a perda de massa. Com diminuição dos grupamentos OH disponíveis para adsorção das moléculas de água, ocorre uma aproximação das microfibrilas de celulose após

o tratamento térmico, o que resulta na contração volumétrica da madeira (VITAL e TRUGILHO, 1997).

5.1.3. Análise termogravimétrica (TGA)

Na Tabela 5 estão apresentadas as médias da perda de massa das partículas, em função da temperatura do tratamento térmico.

Tabela 5. Valores médios de perda de massa (%) das partículas de *Pinus sp.* em função da temperatura do tratamento térmico

Temperatura do tratamento térmico (°C)	Faixa de temperatura							M. residual (%)
	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400	400-450	
Testemunha	0,38	0,41	1,38	11,92	36,33	26,00	2,72	20,86
180	0,19	0,27	1,25	9,79	34,69	29,53	3,26	21,02
200	0,28	0,26	0,99	8,04	33,90	30,53	3,39	22,60
220	0,16	0,28	0,92	5,38	30,94	32,59	3,97	25,76

Observa-se que as perdas de massa foram mínimas nos intervalos de 100 a 150°C e 150 a 200°C, sendo que as partículas termorretificadas apresentaram maior estabilidade térmica que a testemunha.

Na faixa de temperatura entre 200 e 250°C ocorreram perdas de massa da ordem de 1%, o que se deve ao início das reações de decomposição das hemiceluloses.

Entre 250 e 300°C, houve um aumento considerável da perda de massa, verificando-se uma tendência de aumento da estabilidade térmica à medida que se aumentou a temperatura de pré-tratamento das partículas. Observa-se também que a perda de massa das partículas termorretificadas foi menor que a testemunha. Possivelmente, isso se deve ao fato das partículas termorretificadas possuírem menor teor de holocelulose, e conseqüentemente, um maior percentual de lignina que a testemunha, o que lhes confere maior estabilidade térmica. De acordo com Luengo et al. (1997), entre 180 e 290°C, intervalo que abrange as temperaturas utilizadas no tratamento térmico das partículas (180, 200 e 220°C), as hemiceluloses são degradadas, enquanto que a celulose e a lignina sofrem apenas uma degradação parcial.

Segundo Tjeerdsma et al. (1998) e Esteves e Pereira (2009), a ação da temperatura também pode provocar um aumento da cristalinidade da celulose e da condensação da lignina, o que também explica a maior estabilidade térmica das partículas termorretificadas em relação à testemunha.

A maior degradação térmica das partículas de *Pinus sp.* pôde ser observada na faixa de temperatura entre 300 e 350°C, cujos valores de perda de massa ultrapassaram 30%. De acordo com Luengo et al. (1997), entre 290 e 370°C predomina a degradação da celulose, com a quebra das ligações glicosídicas seguida por uma grande emissão de voláteis, tais como ácido acético, metanol, acetona, CO, H₂, CH₄ e CO₂.

Segundo Grønli et al., (2002), acima de 350°C, grande parte do conteúdo de celulose e hemiceluloses da madeira já foi degradada. Desta maneira, a perda de massa das partículas ocorre devido à degradação térmica da lignina. Observa-se que nas faixas de temperatura de 350 a 400°C e 400 a 450°C houve uma tendência de aumento da perda de massa à medida que se aumentou a temperatura de tratamento térmico das partículas, o que se deve ao fato destas partículas apresentarem maior percentual de lignina.

Por fim, verifica-se que as partículas termorretificadas apresentaram maior massa residual que a testemunha. Este resultado já era esperado, visto que o tratamento térmico promoveu uma degradação parcial do conteúdo de holocelulose das partículas, aumentando o percentual de lignina, que é o componente estrutural da madeira mais resistente à degradação térmica. Além disso, a ocorrência de reações de policondensação da lignina e aumento no grau de cristalinidade da celulose também pode ter conferido às partículas uma maior resistência à degradação térmica, de maneira estas perdessem menos massa com a ação da temperatura.

5.1.4. Dimensões das partículas

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios das dimensões das partículas, em função da temperatura do tratamento térmico.

Tabela 6. Valores médios das dimensões das partículas em função da temperatura

Temperatura (°C)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Coefficiente de esbeltez
Testemunha	12,06 A	0,877 A	15,34 A
180	10,84 B	0,862 A	13,45 B
200	10,63 B	0,890 A	13,15 B
220	10,97 AB	0,950 A	12,84 B

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se que as partículas termorretificadas apresentaram um menor comprimento em relação as não tratadas, enquanto que a espessura não sofreu influência significativa da temperatura. Conseqüentemente, o coeficiente de esbeltez das partículas termorretificadas foi significativamente menor.

Este resultado pode estar associado ao atrito das partículas com as paredes do torrificador. Dentro do equipamento, as partículas tem sua resistência à abrasão reduzida, uma vez que estão submetidas a um processo de degradação térmica. Isso foi constatado observando-se uma pequena quantidade de finos gerada após a realização do tratamento térmico.

Diversos autores relatam sobre a influência do coeficiente de esbeltez nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis (MOSLEMI, 1974; VITAL et al. 1992; NAUMANN et al., 2008). No entanto, a amplitude de variação das dimensões das partículas deste trabalho foi inferior à relatada por estes autores. Desta maneira, as propriedades físicas e mecânicas dos painéis provavelmente não serão afetadas pelas suas dimensões.

5.2. Efeito do tratamento térmico nas propriedades físicas dos painéis

5.2.1. Densidade aparente

A densidade aparente média dos painéis não foi influenciada pelos tratamentos, sendo igual a 641 kg/m³ e ficando acima da meta, que era de 600 kg/m³. Provavelmente, isso está associado ao fato dos painéis terem apresentado uma menor espessura do que a preestabelecida, o que resultou em uma diminuição do volume e, conseqüentemente, em um aumento da densidade aparente.

Conforme a norma ABNT/NBR 14810-2 (2002) são classificados como painéis de média densidade aqueles cujos valores encontram-se entre 551 e 750 kg/m³.

Devido à variação na densidade básica das partículas termorretificadas, a taxa de compactação dos painéis foi afetada, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Taxa de compactação dos painéis em função da composição de partículas

Temperatura (°C)	Densidade das partículas (g/cm ³)	Proporção de partículas tratadas (%)	Proporção de partículas não tratadas (%)	Densidade do painel (g/cm ³)	Taxa de compactação
Testemunha	0,35	0	100	0,66	1,89
180	0,38	25	75	0,65	1,84
180	0,38	50	50	0,68	1,83
180	0,38	75	25	0,63	1,72
180	0,38	100	0	0,64	1,68
Média	-	-	-	-	1,77
200	0,41	25	75	0,65	1,81
200	0,41	50	50	0,64	1,72
200	0,41	75	25	0,65	1,65
200	0,41	100	0	0,64	1,55
Média	-	-	-	-	1,68
220	0,41	25	75	0,65	1,81
220	0,41	50	50	0,63	1,71
220	0,41	75	25	0,63	1,63
220	0,41	100	0	0,63	1,52
Média	-	-	-	-	1,67

Observa-se na Tabela 7 que, à medida que se aumentou a temperatura e a proporção de partículas termorretificadas nos painéis, houve uma redução da taxa de compactação, devido ao aumento da densidade básica das partículas tratadas termicamente. Ressalta-se que a redução da taxa de compactação diminui a área de contato entre as partículas, o que pode resultar em menores propriedades de ligação interna e flexão estática (MALONEY, 1993).

5.2.2. Teor de umidade

A análise de variância indicou que o teor de umidade de equilíbrio dos painéis foi afetado pelos tratamentos, ocorrendo efeito isolado da proporção de partículas termorretificadas e da temperatura. As médias dos teores umidade dos painéis estão apresentadas nas Tabelas 8 e 9, em função da proporção e da temperatura, respectivamente.

Tabela 8. Valores médios de teor de umidade de equilíbrio dos painéis em função da proporção de partículas termorretificadas

Proporção (%)	Teor de umidade (%)
25	9,09 A
50	8,30 B
75	7,73 C
100	7,14 D

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 9. Valores médios de teor de umidade de equilíbrio dos painéis em função da temperatura

Temperatura (°C)	Teor de umidade (%)
180	8,63 A
200	7,93 B
220	7,64 B

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se nas Tabelas 8 e 9 que houve uma redução no teor de umidade de equilíbrio dos painéis à medida que se aumentou a temperatura e a proporção de partículas termorretificadas. Essa redução do teor de umidade

se deve a redução na quantidade de grupamentos hidroxílicos livres na madeira, ocasionada principalmente pela degradação das hemiceluloses, tornando as partículas menos higroscópicas. Logo, quanto maior a temperatura e a proporção de partículas termorretificadas, menor será a umidade de equilíbrio dos painéis.

Paul et al. (2006) observaram uma redução no teor de umidade de equilíbrio de painéis do tipo OSB, produzidos com partículas tratadas a 220 e 240°C. Os autores verificaram que maiores temperaturas resultaram em painéis com menor teor de umidade e que a taxa de degradação das hemiceluloses está intrinsecamente relacionada com a temperatura do tratamento térmico.

Mendes (2010) obteve resultados semelhantes ao analisar o efeito do tratamento térmico em painéis do tipo OSB produzidos com partículas tratadas a 200 e 240°C, verificando uma tendência de redução do teor de umidade de equilíbrio dos painéis à medida que se aumentou a temperatura.

5.2.3. Adsorção de vapor d'água

A adsorção de vapor d'água pelos painéis a 90% de umidade e 20°C foi influenciada pelos tratamentos, ocorrendo efeito isolado da proporção de partículas termorretificadas e da temperatura. As médias de adsorção de vapor d'água estão apresentadas nas Tabelas 10 e 11, em função da proporção e da temperatura, respectivamente.

TABELA 10. Valores médios de adsorção de vapor d'água pelos painéis a 90% de umidade e 20°C, em função da proporção de partículas termorretificadas

Proporção (%)	Adsorção de vapor (%)
25	7,43 A
50	6,96 AB
75	6,35 BC
100	5,91 C

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 11. Valores médios de adsorção de vapor d'água pelos painéis a 90% de umidade e 20°C, em função da temperatura

Temperatura (°C)	Adsorção de vapor (%)
180	7,07 A
200	6,95 A
220	5,97 B

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se na Tabela 10 que há uma tendência de redução na adsorção de vapor d'água à medida que se aumenta a proporção de partículas termorretificadas nos painéis. De maneira semelhante ao teor de umidade, estes resultados estão associados à menor higroscopicidade destas partículas.

Observa-se na Tabela 11 que os valores médios de adsorção de vapor não diferiram para as temperaturas de 180 e 200°C. Entretanto, para os painéis produzidos com partículas tratadas a 220°C, a adsorção de vapor foi significativamente menor em relação às demais temperaturas, devido a menor disponibilidade de grupos OH das partículas para fazer ligações com as moléculas de água.

Estes resultados indicam que, mesmo em ambientes com alta umidade relativa, a utilização de partículas termorretificadas pode reduzir significativamente a adsorção de vapor d'água pelos painéis, tornando-os mais resistentes a essas condições. Este é um fato importante, visto que o adesivo a base de uréia-formaldeído é o mais utilizado para a produção de painéis, porém não tem resistência a água, ou seja, é hidrofílico mesmo depois de polimerizado.

5.2.4. Expansão Linear

Analisando o efeito do tratamento térmico sobre a expansão linear dos painéis, verifica-se que houve interação significativa entre proporção de partículas termorretificadas e a temperatura. As médias de expansão linear estão apresentadas na Tabela 12, em função da proporção e da temperatura.

Tabela 12. Valores médios de expansão linear (%) em função da proporção de partículas termorretrificadas e da temperatura

Proporção (%)	Temperatura (°C)		
	180	200	220
25	0,74 Aa	0,78 Aa	0,58 ABb
50	0,64 Aab	0,76 Aa	0,60 Ab
75	0,79 Aa	0,64 Ab	0,46 Abc
100	0,64 Aa	0,63 Aa	0,41 Bb

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Observa-se que a expansão linear foi mais afetada pela temperatura do que pela proporção de partículas termorretrificadas, sendo significativamente mais estáveis os painéis produzidos com partículas tratadas a 220°C, independente da proporção. Essa estabilidade obtida nos painéis se deve a menor higroscopicidade das partículas termorretrificadas em maior temperatura, em decorrência da redução dos grupos hidroxílicos disponíveis.

De acordo com a norma ANSI/A-208.1 (1993), para painéis de média densidade aparente, o valor máximo permitido de expansão linear é de 0,35%. Todos os painéis apresentaram valores médios de expansão linear superiores ao máximo preconizado pela norma, ou seja, mesmo com o tratamento térmico os painéis não atingiram a estabilidade desejada. No entanto, ressalta-se que, em parte, isso se deve ao adesivo utilizado para a produção dos painéis, uma vez que foram obtidas reduções significativas de expansão linear, principalmente para os painéis produzidos com maiores proporções de partículas tratadas à temperatura de 220°C.

5.2.5. Absorção de água

Verificou-se que, após 2 horas de imersão em água, houve efeito significativo dos tratamentos na absorção de água dos painéis, com interação entre a proporção de partículas termorretrificadas e a temperatura. As médias de absorção de água dos painéis após 2 horas de imersão em água estão apresentadas na Tabela 13, em função da proporção e da temperatura.

Tabela 13. Valores médios de absorção de água após 2 horas de imersão em água (%) em função da proporção de partículas termorretificadas e da temperatura.

Proporção (%)	Temperatura (°C)		
	180	200	220
25	81,67 Aa	81,70 Aa	82,81 Aa
50	83,95 Aa	78,91 Aa	79,73 ABA
75	81,21 Aa	78,24 Aba	74,20 Ba
100	83,62 Aa	70,17 Bb	55,14 Cc

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Observa-se que, de modo geral, os painéis produzidos com partículas termorretificadas não apresentaram redução da absorção de água, exceto aqueles produzidos somente com partículas tratadas a 220°C, os quais absorveram significativamente menos água em relação aos demais.

De acordo com Boonstra et al. (2006), durante a imersão em água, os painéis absorvem água livre ou de adesão. A água livre localiza-se no lume das células, espaços intercelulares e na linha de cola, enquanto que a água de adesão encontra-se na parede celular e provavelmente também na linha de cola. Possivelmente, devido à redução nos grupamentos hidroxílicos, as partículas termorretificadas tiveram um menor percentual de água de adesão, reduzindo a absorção de água do painel.

Paul et al. (2006) verificaram que painéis produzidos com partículas *strand* tratadas a 220 e 240°C não apresentaram diferença significativa quanto a absorção de água. Por outro lado, Mendes (2010) observou que, aumentando a temperatura de tratamento de partículas *strand* de 200°C para 240°C, houve uma redução significativa na absorção de água dos painéis. Possivelmente, isso se deve à maior amplitude de temperatura avaliada por este autor em relação àquele.

Mesmo tendo reduzido a absorção de água, os painéis produzidos com partículas termorretificadas apresentaram valores superiores ao máximo permitido pela norma DIN 68 761 (1) – 1961 (SANTANA e PASTORE, 1981), que estabelece que a absorção após 2 horas não deve exceder 10%.

Após 24 horas de imersão em água, houve influência dos tratamentos na absorção de água dos painéis, ocorrendo efeito isolado da proporção de partículas termorretificadas e da temperatura. As médias de absorção de água

dos painéis após 24 horas estão apresentados nas Tabelas 14 e 15, em função da proporção e da temperatura, respectivamente.

Tabela 14. Valores médios de absorção de água após 24 horas de imersão em água, em função da proporção de partículas termorretificadas

Proporção (%)	Absorção de água após 24h (%)
25	94,4 A
50	92,2 AB
75	88,8 BC
100	85,9 C

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Observa-se na Tabela 14 que, à medida que se aumentou a quantidade de partículas termorretificadas nos painéis, a absorção de água foi reduzida, sendo que, a partir de 75% de incorporação, a absorção foi significativamente menor.

Tabela 15. Valores médios de absorção de água após 24 horas de imersão em água, em função da temperatura

Temperatura (°C)	Absorção de água após 24h (%)
180	94,4 A
200	90,7 A
220	85,8 B

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se na Tabela 15 que os painéis produzidos com partículas tratadas a 220°C absorveram significativamente menos água em relação aos demais. Isso indica que, mesmo com a degradação do adesivo a base de uréia-formaldeído, a absorção de água pôde ser reduzida com a utilização de partículas menos higroscópicas.

Apesar de ocorrer uma redução significativa da absorção de água pelos painéis, independente da temperatura e proporção utilizada, todos absorveram mais água que o permitido pela norma DIN 68 761 (1) – 1961 (SANTANA e PASTORE, 1981), que estabelece que a absorção de água após 24 horas deve ser inferior a 15%. Estes resultados já eram esperados, uma vez que o adesivo utilizado na manufatura dos painéis não é resistente água.

5.2.6. Inchamento em espessura após imersão em água

O inchamento em espessura dos painéis após 2 horas de imersão em água foi influenciado pelos tratamentos, ocorrendo interação entre a proporção de partículas termorretificadas e a temperatura. Na Tabela 16 estão apresentados os valores médios de inchamento em espessura dos painéis após 2 horas, em função da proporção e da temperatura.

Tabela 16. Valores médios de inchamento em espessura após 2 horas de imersão em água (%) em função da proporção de partículas termorretificadas e da temperatura

Proporção (%)	Temperatura (°C)		
	180	200	220
25	24,42 ABa	23,88 Aa	22,92 Aa
50	26,23 Aa	19,77 Bb	17,11 Bc
75	21,04 Ca	15,71 Cb	13,76 Cb
100	22,57 BCa	10,85 Db	6,00 Dc

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se que houve redução significativa no inchamento em espessura dos painéis com o aumento da temperatura de tratamento das partículas, exceto aqueles produzidos com 25% de partículas termorretificadas. Observa-se, também, que à medida que se aumentou a quantidade de partículas termorretificadas nos painéis, houve uma redução do inchamento, ou seja, estes ficaram mais estáveis. Apenas para os painéis produzidos com partículas tratadas a 180°C não se observou essa tendência.

De acordo com Kelly (1977), o inchamento em espessura dos painéis de madeira reconstituída ocorre devido à liberação das tensões de compressão oriundas do processo de prensagem e também devido ao inchamento das partículas de madeira.

Possivelmente, as partículas submetidas ao tratamento apresentaram um menor inchamento em decorrência da redução dos grupamentos hidroxílicos disponíveis para adsorção da água nos constituintes da parede celular.

Além disso, com aumento da densidade das partículas termorretificadas, uma menor quantidade destas foi necessária durante a formação do colchão para se obter a densidade pré-determinada do painel. Desta maneira, a taxa de compactação e as tensões de compressão foram reduzidas e, conseqüentemente, os painéis apresentaram menor inchamento em espessura.

Goroyias e Hale (2002) realizaram o tratamento térmico de partículas *strand* nas temperaturas de 200, 210, 220, 230, 240, 250 e 260°C por um período de 20 minutos. Os autores observaram uma redução significativa do inchamento em espessura à medida que se aumentou a temperatura.

Paul et al. (2006) verificaram que painéis do tipo OSB produzidos com partículas tratadas a 240°C tiveram um inchamento em espessura significativamente menor que os painéis produzidos com partículas tratadas a 220°C.

Mendes (2010) verificou que painéis do tipo OSB produzidos com partículas tratadas a 200 e 240°C apresentaram inchamento em espessura de 23,6% e 8,5%, respectivamente, após 2 horas de imersão em água.

De acordo com a norma DIN 68 761 (1) – 1961 (SANTANA e PASTORE, 1981), o inchamento em espessura máximo após 2h de imersão em água deve ser de 6%. Verifica-se na Tabela 16 que, à exceção dos painéis produzidos com 100% de partículas tratadas a 220°C, todos os demais incharam mais que o máximo permitido pela norma.

Após 24 horas de imersão em água, o inchamento em espessura dos painéis também foi influenciado pelos tratamentos, ocorrendo interação significativa entre a proporção de partículas termorretificadas e a temperatura. Na Tabela 17 estão apresentados os valores médios de inchamento em espessura dos painéis após 24 horas, em função da proporção e da temperatura.

Tabela 17. Valores médios de inchamento em espessura após 24 horas de imersão em água (%) em função da proporção de partículas termorretificadas e da temperatura

Proporção (%)	Temperatura (°C)		
	180	200	220
25	28,54 ABab	30,01 Aa	25,9 Ab
50	31,39 Aa	23,99 Bb	20,59 Bc
75	26,01 Ba	19,45 Cb	16,29 Cc
100	27,64 Ba	14,51 Db	9,45 Dc

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se que, mesmo após 24 horas de imersão em água, a utilização de pelo menos 50 % de partículas tratadas a 200 e 220°C reduziu significativamente o inchamento em espessura dos painéis. Este resultado demonstra que, mesmo com a utilização de um adesivo não resistente a água, a incorporação de partículas termorretificadas nos painéis pode aumentar significativamente a estabilidade dimensional.

A norma DIN 68 761 (1) – 1961 (SANTANA e PASTORE, 1981) estabelece que o inchamento em espessura máximo após 24h de imersão em água deve ser de 15 %. Verifica-se na Tabela 17 que os painéis produzidos apenas com partículas tratadas a 200 e 220°C apresentaram menor inchamento que o máximo permitido pela norma. Todos os demais painéis incharam mais que o preconizado pela norma.

5.3. Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas dos painéis

5.3.1. Tração perpendicular

A resistência à tração perpendicular, também conhecida como ligação interna, é um importante parâmetro para avaliação da qualidade de um painel, pois está diretamente associada à adesão das partículas de madeira.

De acordo com a análise de variância, houve influência dos tratamentos na resistência dos painéis à tração perpendicular, ocorrendo efeito isolado da proporção de partículas termorretificadas e da temperatura. As médias de

resistência dos painéis à tração perpendicular estão apresentadas nas Tabelas 18 e 19, em função da proporção e da temperatura, respectivamente.

Tabela 18. Valores médios de resistência à tração perpendicular em função da proporção de partículas termorretificadas

Proporção (%)	Resistência (MPa)
25	0,52 A
50	0,44 B
75	0,37 C
100	0,37 C

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 19. Valores médios de resistência à tração perpendicular em função da temperatura

Temperatura (°C)	Resistência (MPa)
180	0,46 A
200	0,42 B
220	0,40 B

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Nas Tabelas 18 e 19 verifica-se uma perda significativa de resistência à tração perpendicular à medida que se aumenta a temperatura e a proporção de partículas termorretificadas nos painéis.

Sernek et al. (2004) afirmam que a resistência a tração perpendicular de painéis produzidos com partículas tratadas acima de 180°C pode ser reduzida, devido à movimentação dos extrativos para a superfície das partículas e também à inativação parcial desta superfície. O fato do tratamento térmico ser realizado em um ambiente hermético pode ter favorecido a condensação de componentes produzidos pela degradação térmica da madeira na superfície das partículas, como o alcatrão, por exemplo. Isso ocasiona uma diminuição dos grupamentos OH disponíveis, acarretando na redução da adsorção química entre a madeira e o adesivo, além de deixar a superfície menos permeável.

Na maioria dos casos, a madeira sólida tem sua resistência mecânica reduzida com o tratamento térmico, o que é devido à degradação térmica dos

constituintes da parede celular, especialmente polissacarídeos amorfos (PONCSAK et al., 2006; BOONSTRA et al., 2007, ESTEVES et al., 2008b). De maneira semelhante à madeira sólida, as partículas de madeira tratadas termicamente também podem ter sofrido uma redução na resistência a esforços mecânicos.

Por outro lado, Paul et al. (2006) e Mendes (2010) não observaram diferença significativa de resistência a tração perpendicular para painéis do tipo OSB produzidos com partículas tratadas a diferentes temperaturas. Entretanto, vale destacar que estes autores utilizaram adesivos a base de melamina-uréia-fenol-formaldeído e fenol-formaldeído, que formam ligações cruzadas durante a polimerização do adesivo, aumentando a resistência da linha de cola (PIZZI e MITTAL, 1994).

De acordo com a norma ABNT/NBR 14810-2 (2002), o valor mínimo de resistência à tração perpendicular para painéis de média densidade é de 0,35 MPa. Observa-se nas Tabelas 18 e 19 que todos os painéis apresentaram resistência à tração perpendicular superior ao mínimo requerido pela norma.

5.3.2. Arrancamento de parafuso

A resistência dos painéis ao arrancamento de parafuso foi influenciada pela proporção de partículas termorretificadas. Na Tabela 20 estão apresentadas as médias de resistência dos painéis ao arrancamento de parafuso, em função da proporção.

Tabela 20. Valores médios de resistência ao arrancamento de parafuso em função da proporção de partículas termorretificadas

Proporção (%)	Resistência ao arrancamento de parafuso (N)
25	1371,8 A
50	1210,0 B
75	1104,9 B
100	1157,9 B

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Observa-se que os painéis produzidos com 25% de partículas termorretificadas apresentaram maior resistência ao arrancamento de parafuso, sendo significativamente diferente dos demais. Todos os painéis apresentaram

valores médios de resistência ao arrancamento de parafuso superiores ao mínimo requerido pela norma ABNT/NBR 14810-2 (2002), que estabelece um valor mínimo de 1020 N para painéis de média densidade.

5.3.3. Dureza Janka

De acordo com o resultado da análise de variância, a dureza janka dos painéis produzidos com partículas termorretificadas não foi afetada pelos tratamentos. A dureza média dos painéis foi de 22,6 MPa, sendo superior ao valor mínimo requerido pela norma ANSI/A-208.1 (1993), que é de 21,8 MPa.

Okino et al. (2007) verificaram que a dureza janka de painéis do tipo OSB não foi afetada pelo pós-tratamento térmico na temperatura de 190°C, durante 12 minutos, sendo que o valor médio de dureza dos painéis foi de 43,59 MPa.

5.3.4. Compressão longitudinal

A resistência dos painéis à compressão longitudinal foi afetada pelos tratamentos, ocorrendo interação entre a proporção de partículas termorretificadas e a temperatura. Na Tabela 21 estão apresentadas as médias de resistência dos painéis à compressão longitudinal, em função da proporção e da temperatura.

Tabela 21. Valores médios de resistência à compressão longitudinal (MPa) em função da proporção de partículas termorretificadas e da temperatura

Proporção (%)	Temperatura (°C)		
	180	200	220
25	6,94 Aa	6,35 Ab	6,16 Ab
50	6,41 Aa	5,47 Bb	5,59 ABb
75	6,70 Aa	5,57 Bb	5,33 Bb
100	5,78 Ba	5,82 Aba	5,39 Ba

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas e ao longo das linhas seguidas de mesmas letras minúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se que, para a temperatura de 180°C, apenas os painéis produzidos com 100% de partículas termorretificadas tiveram perdas significativas de resistência à compressão longitudinal em relação às demais

temperaturas. Para os painéis produzidos com partículas tratadas nas temperaturas de 200 e 220°C, observa-se que incorporações a partir de 50% de partículas termorretrificadas resultaram na perda de resistência dos mesmos.

À exceção dos painéis produzidos apenas com partículas termorretrificadas, o aumento da temperatura reduziu a resistência à compressão longitudinal dos painéis.

5.3.5. Resistência à flexão estática

5.3.5.1. Módulo de ruptura (MOR)

De acordo com a análise de variância, houve influência dos tratamentos no módulo de ruptura dos painéis, ocorrendo efeito isolado da proporção de partículas termorretrificadas e da temperatura. As médias de módulo de ruptura dos painéis estão apresentadas nas Tabelas 22 e 23, em função da proporção e da temperatura, respectivamente.

Tabela 22. Valores médios do módulo de ruptura em função da proporção de partículas termorretrificadas

Proporção (%)	MOR (MPa)
25	6,31 A
50	5,50 B
75	4,71 C
100	4,37 C

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 23. Valores médios do módulo de ruptura em função da temperatura

Temperatura (°C)	MOR (MPa)
180	6,06 A
200	4,86 B
220	4,73 B

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se na Tabela 22 que o aumento da proporção de partículas termorretrificadas nos painéis resultou em uma redução do módulo de ruptura. Entretanto, para os painéis produzidos com 75 e 100% de partículas termorretrificadas, não foi observada diferença significativa.

Observa-se na Tabela 23 que os painéis produzidos com partículas tratadas a 200 e 220°C tiveram uma redução no módulo de ruptura próxima a 20% em relação àqueles produzidos com partículas tratadas na temperatura de 180°C. Resultados semelhantes foram verificados por Mendes (2010), que obteve uma redução de aproximadamente 10% no módulo de ruptura de painéis do tipo OSB ao aumentar a temperatura de tratamento das partículas de 200°C para 240°C.

Em um painel de madeira reconstituída, as partículas são individualmente tracionadas e comprimidas durante o teste de flexão estática. Uma vez que a degradação térmica dos constituintes da parede celular resulta na diminuição da resistência mecânica das partículas de madeira, as propriedades mecânicas dos painéis também são afetadas.

Outro fator que também pode ter afetado o módulo de ruptura dos painéis foi a redução da adesão química, devido à inativação da superfície das partículas termorretificadas e à movimentação de extrativos para a superfície destas partículas. Além disso, com o aumento da densidade das partículas termorretificadas, uma menor quantidade destas foi necessária durante a formação do colchão para se obter a densidade pré-determinada do painel, resultando em uma redução na taxa de compactação. Desta maneira, havia menos partículas para resistir aos esforços mecânicos, o que também pode ter resultado na redução do módulo de ruptura.

A norma ABNT/NBR 14810-2 (2002) estabelece que, para painéis de média densidade, o valor mínimo de módulo de ruptura deve ser de 16 MPa. Verifica-se nas Tabelas 22 e 23 que todos os painéis produzidos com partículas termorretificadas foram inferiores ao valor mínimo requerido pela norma.

5.3.5.2. Módulo de elasticidade (MOE)

O módulo de elasticidade dos painéis foi afetado pela proporção de partículas termorretificadas e pela temperatura de forma isolada, conforme a análise de variância. As médias de módulo de elasticidade dos painéis estão apresentadas nas Tabelas 24 e 25, em função da proporção e da temperatura, respectivamente.

Tabela 24. Valores médios do módulo de elasticidade em função da proporção de partículas termorretificadas

Proporção (%)	MOE (MPa)
25	678,15 A
50	645,13 AB
75	624,58 B
100	611,21 B

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 25. Valores médios do módulo de elasticidade em função da temperatura

Temperatura (°C)	MOE (MPa)
180	707,80 A
200	591,59 B
220	619,91 B

Médias seguidas de mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se na Tabela 24 que o aumento na proporção de partículas termorretificadas nos painéis ocasionou a redução no módulo de elasticidade. Entretanto, para as proporções de 50% ou mais, as médias de módulo de elasticidade não diferiram significativamente entre si.

Conforme se observa na Tabela 25, o aumento da temperatura reduziu em até 20% o módulo de elasticidade dos painéis. Entretanto, para as temperaturas de 200 ou 220°C, as médias de módulo de elasticidade não diferiram significativamente entre si.

Semelhantemente ao módulo de ruptura, a redução no módulo de elasticidade pode estar associada à diminuição da ligação interna dos painéis produzidos com partículas termorretificadas. Além disso, a diminuição da resistência mecânica das partículas e da taxa de compactação dos painéis também podem ter ocasionado a redução do módulo de elasticidade.

Goroyias e Hale (2002) verificaram uma redução de até 20% no módulo de elasticidade de painéis do tipo OSB à medida que se aumentou a temperatura de tratamento das partículas.

Paul et al. (2006) não observaram diferença significativa para o módulo de elasticidade para painéis do tipo OSB produzidos com partículas tratadas a 200 e 220°C. Possivelmente, a maior resistência da linha de cola dos adesivos

utilizados por estes autores (melamina-uréia-fenol-formaldeído e fenol-formaldeído) evitou que houvesse um decréscimo na resistência dos painéis.

O valor mínimo de módulo de elasticidade requerido pela norma ANSI/A-208.1 (1993) é de 1691,6 MPa. Conforme se observa nas Tabelas 24 e 25, nenhum dos painéis atendeu a esta exigência.

5.3. Molhabilidade

Os resultados do teste de molhabilidade, representados pelo ângulo de contato entre o adesivo a base de uréia-formaldeído e os painéis, estão apresentados na Figura 4.

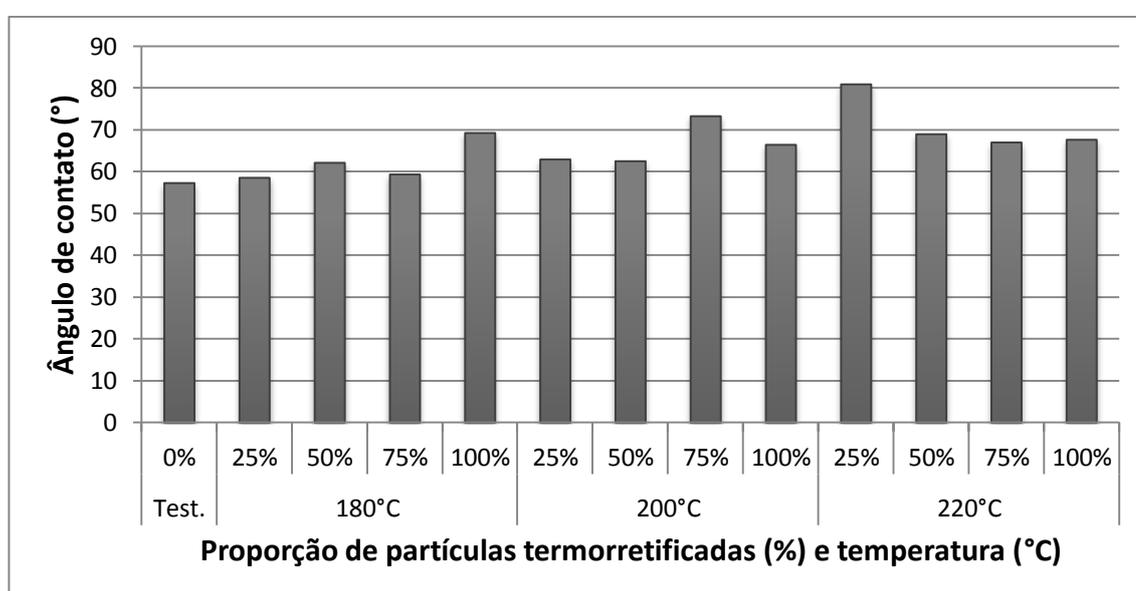


Figura 4. Valores médios do ângulo de contato entre o adesivo a base de uréia-formaldeído e os painéis.

Observa-se que, de maneira geral, os painéis produzidos com partículas termorretificadas apresentaram maiores ângulos de contato em relação à testemunha. Possivelmente, estes resultados se devem a diminuição dos grupamentos hidroxílicos livres nas partículas tratadas termicamente, gerando uma superfície parcialmente inativada. Além disso, o tratamento térmico promoveu modificações na estrutura dos componentes da parede celular, em decorrência da plasticização da lignina, resultando na redução da molhabilidade dos painéis (HAKKOU et al., 2005).

Analisando os painéis produzidos apenas com partículas termorretificadas, verifica-se que não houve influência do aumento da temperatura de tratamento das partículas no ângulo de contato. Este resultado é contrário à afirmação de Vernois (2001). Segundo o autor, para tratamentos térmicos acima de 200°C, a superfície da madeira torna-se bastante hidrofóbica, de maneira que a absorção de adesivos e vernizes torna-se mais lenta em relação a uma madeira não tratada. Isso acontece porque a energia superficial da madeira é drasticamente afetada pela temperatura, reduzindo a sua molhabilidade.

Possivelmente, fatores como a maior rugosidade da superfície dos painéis em relação à madeira sólida, bem como os espaços vazios entre as partículas dificultaram a mensuração do ângulo de contato. De acordo com Jennings (2003), a tensão superficial e a viscosidade do líquido, bem como a rugosidade superficial e a porosidade da madeira são fatores que influenciam no ângulo de contato. A porosidade, por exemplo, impede que a gota se equilibre e mantenha sua conformação, permitindo a penetração do líquido na madeira (CÉSAR, 2011).

5.4. Efeito do tipo de adesivo e da adição de parafina nas propriedades dos painéis

De acordo com a análise variância, houve influência do tipo de adesivo utilizado nas propriedades dos painéis produzidos com partículas sem tratamento térmico (Tratamentos adicionais). Na Tabela 26 estão apresentadas as médias das propriedades físicas dos painéis produzidos com partículas sem tratamento térmico, em função do adesivo utilizado.

Tabela 26. Propriedades físicas dos painéis produzidos com partículas sem tratamento térmico, em função do adesivo utilizado

Adesivo	DA (kg/m ³)	UEH (%)	AV (%)	EL (%)	AA (%)		IE (%)	
					2h	24h	2h	24h
UF	633 B	10,14 A	7,99 B	0,70 A	80,1 A	92,5 A	26,5 A	30,5 A
UF+P	626 B	8,94 C	7,57 B	0,54 B	70,9 AB	78,2 B	22,7 B	25,8 B
Ff	707 A	9,56 B	9,25 A	0,36 C	60,6 B	68,7 B	19,3 C	21,0 C
Média	655	9,55	8,27	0,53	70,5	79,8	22,8	25,8

Legenda: UF = Uréia-formaldeído; UF+P = Uréia-formaldeído + parafina; Ff = Fenol-formaldeído; DA= Densidade aparente; UEH= Umidade de equilíbrio higroscópico; AV= Adsorção de vapor d'água; EL= Expansão linear; AA= Absorção de água; IE= Inchamento em espessura.

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Observa-se que a densidade aparente dos painéis produzidos com o adesivo a base de fenol-formaldeído foi maior que as demais. Desta maneira, estes poderão apresentar melhores resultados nas propriedades mecânicas, devido à correlação positiva existente entre a resistência mecânica do painel e sua densidade (MOSLEMI, 1974). Conforme a norma ABNT/NBR 14810-2 (2002) são classificados como painéis de média densidade aqueles cujos valores encontram-se entre 551 e 750 kg/m³.

Verifica-se que tanto os painéis produzidos com fenol-formaldeído como aqueles produzidos com uréia-formaldeído mais parafina tiveram menor umidade de equilíbrio em comparação com os painéis produzidos apenas com o adesivo à base de uréia-formaldeído. Este resultado provavelmente se deve à maior resistência do adesivo fenólico a água bem como à hidrofobicidade da parafina (KELLY, 1977; PIZZI e MITTAL, 1994).

Para a adsorção de vapor d'água, observa-se que não houve diferença significativa entre os painéis produzidos com uréia-formaldeído e aqueles produzidos com uréia-formaldeído mais de parafina. De acordo com Moslemi (1974), a utilização da parafina aumenta a resistência dos painéis à água líquida, devido à impregnação dos espaços vazios com esta substância. No entanto, a adsorção de vapor em condições de alta umidade relativa não é afetada, uma vez que, neste caso, as moléculas de água são adsorvidas na parede das células.

Verifica-se que os maiores valores de adsorção de vapor foram observados para os painéis produzidos com o adesivo fenólico. Em contrapartida, estes painéis apresentaram menor expansão linear. Possivelmente, as características alcalinas do adesivo fenólico promoveram

uma maior adsorção de água na parede celular, mas a sua elevada resistência à hidrólise proporcionou uma menor variação dimensional dos painéis (KELLY, 1977; PIZZI e MITTAL, 1994).

Observa-se que a adição de parafina em conjunto com a uréia-formaldeído reduziu a expansão linear dos painéis, em comparação com aqueles em que se utilizou apenas o adesivo à base de uréia-formaldeído. No entanto, todos os painéis apresentaram maior expansão linear que o máximo permitido pela norma ANSI/A-208.1 (1993), que é de 0,35%.

Verifica-se que, após 2 horas de imersão, a adição de parafina não interferiu na absorção de água dos painéis produzidos com o adesivo a base de uréia-formaldeído. Porém, após 24 horas, houve uma redução na absorção de água dos painéis com parafina. Observa-se, também, que a utilização do adesivo fenólico reduziu significativamente a absorção de água após 2 e 24 horas.

A norma DIN 68 761 (1) – 1961 (SANTANA e PASTORE, 1981) estabelece que a absorção após 2 e 24 horas de imersão em água deve ser inferior a 10 e 15%, respectivamente. Observa-se na Tabela 26 que todos os painéis absorveram mais água que o máximo permitido pela norma.

Verifica-se que tanto os painéis produzidos com uréia-formaldeído com adição de parafina como aqueles produzidos com fenol-formaldeído apresentaram menor inchamento em espessura após imersão em água, em comparação com a condição em que se utilizou apenas o adesivo à base de uréia-formaldeído.

Estes resultados estão de acordo com Kelly (1977), que afirma que a aplicação da parafina tem um efeito significativo na redução das variações dimensionais de painéis de partículas, tais como inchamento em espessura e expansão linear. A elevada resistência à hidrólise do adesivo fenólico também contribuiu significativamente na melhoria da estabilidade dimensional dos painéis.

De acordo com a norma DIN 68 761 (1) – 1961 (SANTANA e PASTORE, 1981), o inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água deve ser inferior a 6% e 15%, respectivamente. Verifica-se na Tabela 26 que todos os painéis apresentaram maior inchamento em espessura que o máximo preconizado pela norma.

Na Tabela 27 são apresentadas as médias das propriedades mecânicas dos painéis produzidos com partículas sem tratamento térmico, em função do adesivo utilizado.

Tabela 27. Propriedades mecânicas dos painéis produzidos com partículas sem tratamento térmico, em função do adesivo utilizado

Adesivo	TP (MPa)	AP (N)	DJ (MPa)	CL (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
UF	0,89 B	1376 C	23,78 B	8,11 A	8,93 B	837,76 C
UF+P	0,91 B	1679 B	29,96 A	8,36 A	8,62 B	969,63 B
Ff	1,36 A	2076 A	33,83 A	8,72 A	11,39 A	1154,88 A
Média	1,05	1710	29,19	8,40	9,65	987,42

Legenda: UF= Uréia-formaldeído; UF+P = Uréia-formaldeído + parafina; Ff = Fenol-formaldeído; TP=Tração perpendicular; AP=Arrancamento de parafuso; DJ=Dureza Janka; CL= Compressão longitudinal; MOR= Módulo de Ruptura; MOE= Módulo de elasticidade.

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Conforme a Tabela 27 verifica-se que, à exceção da resistência à compressão longitudinal, os maiores resultados de propriedades mecânicas foram observados para os painéis produzidos com fenol-formaldeído. Estes resultados estão associados à maior resistência da linha de cola a esforços mecânicos, devido à formação de ligações cruzadas durante a polimerização e cura deste adesivo (PIZZI e MITTAL, 1994).

Observa-se que não houve diferença significativa de resistência à tração perpendicular entre os painéis produzidos com adesivo a base de uréia-formaldeído, com e sem adição de parafina, sendo que o valor médio foi de 0,90 MPa. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Iwakiri et al. (2001), ao avaliar as propriedades de painéis de partículas de pinus tropicais produzidos com adesivo a base de uréia formaldeído. Os autores verificaram que os painéis fabricados com a mistura de cinco espécies de pinus apresentaram resistência à tração perpendicular igual a 0,85 MPa.

Desta maneira, a utilização de partículas produzidas com resíduos de embalagens de madeira não afetou a resistência à tração perpendicular dos painéis, ou seja, a adesão entre as partículas não foi prejudicada pelo adesivo já polimerizado presente nos painéis compensados que compõem as embalagens.

Considerando ainda os painéis produzidos com adesivo a base de uréia-formaldeído, verifica-se que a adição de parafina não interferiu nos resultados

de resistência à compressão longitudinal e módulo de ruptura. Entretanto, a resistência ao arrancamento de parafuso, dureza Janka e módulo de elasticidade aumentaram significativamente com a utilização deste aditivo.

De acordo com a norma ABNT/NBR 14810-2 (2002), os valores mínimos de resistência à tração perpendicular e arrancamento de parafuso devem ser de 0,35 MPa e 1020 N, respectivamente. A norma ANSI/A-208.1 (1993) preconiza um valor mínimo de 21,8 MPa para a dureza janka. Observa-se na Tabela 27 que todos os painéis atenderam às exigências das referidas normas.

As propriedades de flexão dos painéis não atenderam as especificações da norma ABNT/NBR 14810-2 (2002) e ANSI/A-208.1 (1993), que estabelecem valores mínimos de 16 MPa para o MOR e 1691,6 MPa para o MOE, respectivamente. Possivelmente, a utilização de partículas de elevada espessura (aproximadamente 1,0 mm) resultou na redução do MOR e MOE dos painéis, uma vez os melhores resultados para as propriedades de flexão são obtidos com a utilização de partículas mais finas.

Pedrazzi et al. (2006) verificaram que painéis produzidos com partículas de aproximadamente 1,0 mm de espessura apresentaram valores de MOR e MOE iguais a 8,46 MPa e 1037,94 MPa, respectivamente. Mendoza (2010) obteve valores de MOR e MOE iguais a 6,0 MPa e 480 MPa para painéis produzidos com partículas de 1,0 mm de espessura.

5.5. Comparação entre as diferentes condições do tratamento térmico e os tratamentos adicionais

As propriedades físicas dos tratamentos adicionais e dos painéis produzidos com partículas termorretificadas estão apresentadas na Tabela 28, em função da proporção.

Tabela 28. Valores médios das propriedades físicas dos tratamentos adicionais e dos painéis produzidos com partículas termorretificadas, em função da proporção

Proporção (%)	Adesivo	DA (kg/m ³)	UEH (%)	AV (%)	EL (%)	AA (%)		IE (%)	
						2h	24h	2h	24h
0	UF (TA1)	633 A	10,14 A	7,99 A	0,70 A	80,1 A	92,5 A	26,5 A	30,5 A
25	UF	647 A	9,09 B	7,43 A	0,70 A	82,1 A	94,4 A	23,7 A	28,1 A
50	UF	648 A	8,30 B	6,96 A	0,67 A	80,9 A	92,2 A	21,0 A	25,3 A
75	UF	636 A	7,73 B	6,35 B	0,63 A	77,9 A	88,8 A	16,8 B	20,6 B
100	UF	633 A	7,14 B	5,91 B	0,56 A	69,6 A	85,9 A	13,1 B	17,2 B
Média	-	639	8,48	6,93	0,65	78,1	90,7	20,2	24,4

0	UF+P(TA2)	626 A	8,94 A	7,57 A	0,54 A	70,9 B	78,2 B	22,7 A	25,8 A
25	UF	647 A	9,09 A	7,43 A	0,70 A	82,1 A	94,4 A	23,7 A	28,1 A
50	UF	648 A	8,30 A	6,96 A	0,67 A	80,9 B	92,2 A	21,0 A	25,3 A
75	UF	636 A	7,73 B	6,35 B	0,63 A	77,9 B	88,8 A	16,8 A	20,6 A
100	UF	633 A	7,14 B	5,91 B	0,56 A	69,6 B	85,9 B	13,1 B	17,2 B
Média	-	638	8,24	6,84	0,62	76,3	87,9	19,5	23,4

0	FF (TA3)	707 A	9,56 A	9,25 A	0,36 B	60,6 B	68,7 B	19,3 A	21,0 A
25	UF	647 B	9,09 A	7,43 B	0,70 A	82,1 A	94,4 A	23,7 A	28,1 A
50	UF	648 B	8,30 B	6,96 B	0,67 A	80,9 A	92,2 A	21,0 A	25,3 A
75	UF	636 B	7,73 B	6,35 B	0,63 A	77,9 A	88,8 A	16,8 A	20,6 A
100	UF	633 B	7,14 B	5,91 B	0,56 A	69,6 B	85,9 A	13,1 A	17,2 A
Média	-	654	8,36	7,18	0,58	74,2	86,0	18,8	22,5

Legenda: UF= Uréia-formaldeído; UF+P= Uréia-formaldeído+parafina; FF= Fenol-formaldeído; TA1, TA2, TA3= Tratamentos adicionais 1, 2, 3; DA= Densidade aparente; UEH= Umidade de equilíbrio higroscópico; AV= Adsorção de vapor d'água; EL= Expansão linear; AA= Absorção de água; IE= Inchamento em espessura.

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente do respectivo tratamento adicional pelo teste de Dunnett, a 5% de probabilidade.

Verifica-se que a densidade dos painéis produzidos com partículas termorretificadas não diferiu significativamente dos tratamentos adicionais 1 e 2. A densidade aparente do tratamento adicional 3 foi maior que as obtidas para os painéis produzidos com partículas termorretificadas.

De maneira geral, na medida em que se aumentou a proporção de partículas termorretificadas, os painéis apresentaram menor teor de umidade de equilíbrio e adsorção de vapor que os tratamentos adicionais. Possivelmente, isso se deve a redução da higroscopicidade das partículas termorretificadas.

A expansão linear dos painéis produzidos com partículas termorretificadas não diferiu significativamente dos tratamentos adicionais 1 e 2. Comparando com o tratamento adicional 3, todos os painéis produzidos com partículas termorretificadas apresentaram maior expansão linear. Estes resultados demonstram que a expansão linear dos painéis é mais influenciada pelo tipo de adesivo do que pelas características de higroscopicidade das partículas.

A absorção de água dos painéis produzidos com partículas termorretificadas não diferiu significativamente do tratamento adicional 1. Isso se deve ao fato dos adesivos a base de uréia se degradarem quando em contato com a água. Desta maneira, mesmo com a utilização de partículas menos higroscópicas, os painéis não reduziram sua absorção de água.

No entanto, quando comparados aos demais tratamentos adicionais, observa-se que alguns painéis produzidos com partículas termorretificadas apresentaram maior absorção de água. Após 2 horas de imersão, os painéis produzidos com 25% de partículas termorretificadas absorveram mais água que o tratamento adicional 2. Após 24 horas, painéis produzidos com até 75% de partículas termorretificadas absorveram mais água que este tratamento adicional.

Avaliando a resistência à água dos painéis produzidos com partículas termorretificadas em comparação com o tratamento adicional 3, observa-se que todos os painéis produzidos com partículas termorretificadas absorveram mais água, à exceção daqueles com 100% de partículas tratadas, que absorveram uma quantidade de água semelhante a este tratamento adicional após 2 horas.

Diante destes resultados, verifica-se que a absorção de água dos painéis é mais influenciada pela resistência do adesivo à água do que pelas características de higroscopicidade das partículas. Resultados semelhantes também foram observados por Paul et al. (2006), ao comparar o efeito do tratamento térmico de painéis do tipo OSB utilizando diferentes adesivos.

Observa-se que os painéis produzidos com maiores proporções de partículas termorretificadas apresentaram menor inchamento em espessura que os tratamentos adicionais 1 e 2. Possivelmente, a redução na higroscopicidade das partículas termorretificadas fez com que elas absorvessem menos água, resultando em um menor inchamento. Aliado a este fato, os painéis com partículas termorretificadas tiveram uma redução nas tensões de compressão devido a menor taxa de compactação, que, por sua vez, está associada à maior densidade das partículas tratadas termicamente.

Com relação ao tratamento adicional 3, os painéis produzidos com partículas termorretificadas não apresentaram diferença significativa de inchamento em espessura.

Estes resultados indicam que tanto o tipo de adesivo quanto as características de higroscopicidade das partículas termorretificadas podem influenciar o inchamento em espessura dos painéis.

Na Tabela 29 estão apresentados os valores médios das propriedades físicas dos tratamentos adicionais e dos painéis produzidos com partículas termorretificadas, em função da temperatura.

Tabela 29. Valores médios das propriedades físicas dos tratamentos adicionais e dos painéis produzidos com partículas termorretificadas, em função da temperatura

Temperatura (°C)	Adesivo	DA (kg/m ³)	UEH (%)	AV (%)	EL (%)	AA (%)		IE (%)	
						2h	24h	2h	24h
25	UF (TA1)	633 A	10,14 A	7,99 A	0,70 A	80,1 A	92,5 A	26,5 A	30,5 A
180	UF	649 A	8,63 B	7,07 A	0,70 A	82,6 A	94,4 A	23,6 A	28,4 A
200	UF	641 A	7,93 B	6,95 A	0,70 A	77,3 A	90,7 A	17,6 B	22,0 B
220	UF	633 A	7,64 B	5,97 B	0,51 B	73,0 A	85,8 A	14,9 B	18,1 B
Média	-	640	8,23	6,76	0,64	77,8	90,5	19,3	23,4
25	UF+P(TA2)	626 A	8,94 A	7,57 A	0,54 B	70,9 B	78,2 B	22,7 A	25,8 A
180	UF	649 A	8,63 A	7,07 A	0,70 A	82,6 A	94,4 A	24,6 A	28,4 A
200	UF	641 A	7,93 A	6,95 A	0,70 A	77,3 B	90,7 A	17,6 A	22,0 A
220	UF	633 A	7,64 B	5,97 B	0,51 B	73,0 B	85,8 A	14,9 B	18,1 B
Média	-	640	8,13	6,73	0,63	77,1	89,4	19,0	23,0
25	FF (TA3)	707 A	9,56 A	9,25 A	0,36 B	60,6 B	68,7 B	19,3 A	21,0 B
180	UF	649 B	8,63 A	7,07 B	0,70 A	82,6 A	94,4 A	23,6 A	28,4 A
200	UF	641 B	7,93 B	6,95 B	0,70 A	77,3 A	90,7 A	17,6 A	22,0 B
220	UF	633 B	7,64 B	5,97 B	0,51 A	73,0 A	85,8 A	14,9 A	18,1 B
Média	-	646	8,18	6,86	0,62	76,3	88,7	18,7	22,7

Legenda: UF= Uréia-formaldeído; UF+P= Uréia-formaldeído+parafina; FF= Fenol-formaldeído; TA1, TA2, TA3= Tratamentos adicionais 1, 2, 3; DA= Densidade aparente; UEH= Umidade de equilíbrio higroscópico; AV= Adsorção de vapor d'água; EL= Expansão linear; AA= Absorção de água; IE= Inchamento em espessura.

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente do respectivo tratamento adicional pelo teste de Dunnett, a 5% de probabilidade.

De acordo com a Tabela 29 verifica-se que apenas a densidade do tratamento adicional 1 foi superior à dos painéis produzidos com partículas termorretificadas.

A utilização de partículas tratadas a temperaturas mais elevadas resultou na redução do teor de umidade de equilíbrio e da adsorção de vapor dos painéis em relação aos tratamentos adicionais. Tal fato indica que estas propriedades foram bastante influenciadas pela redução na higroscopicidade das partículas termorretificadas, principalmente a temperaturas mais elevadas.

Observa-se que a expansão linear dos painéis produzidos com partículas tratadas a 220°C foi inferior ao tratamento adicional 1. Entretanto, para quase todas as temperaturas avaliadas, os painéis produzidos com partículas termorretificadas apresentaram maior expansão linear que os tratamentos adicionais, indicando que a adição da parafina ou a utilização do adesivo fenólico foram mais efetivas na redução da expansão linear que a utilização de partículas termorretificadas.

Verifica-se que a absorção de água dos painéis produzidos com partículas termorretificadas não diferiu significativamente do tratamento adicional 1. Com relação aos demais tratamentos adicionais, de maneira geral, a absorção de água dos painéis produzidos com partículas termorretificadas foi superior, indicando uma forte relação desta propriedade com o tipo de adesivo utilizado.

Observa-se que os painéis produzidos com partículas tratadas a temperaturas mais elevadas apresentaram inchamento em espessura de 30 a 40% menor que os tratamentos adicionais 1 e 2. De maneira geral, os painéis produzidos com partículas termorretificadas não apresentaram diferença significativa de inchamento em espessura com relação ao tratamento adicional 3.

Estes resultados indicam que tanto o tipo de adesivo como as características de higroscopicidade das partículas termorretificadas podem influenciar o inchamento em espessura dos painéis.

Paul et al. (2006) verificaram que painéis do tipo OSB produzidos com partículas termorretificadas e adesivo a base de melamina-uréia-fenol-formaldeído apresentaram redução significativa de UEH, absorção de água e inchamento em espessura em relação aos painéis produzidos com partículas sem tratamento térmico.

Mendes (2010) observou que painéis do tipo OSB produzidos com partículas termorretificadas e utilizando o adesivo a base de fenol-formaldeído apresentaram uma redução de aproximadamente 50% para o inchamento em espessura e 8% para a absorção de água após 24 horas, comparando com os painéis produzidos com partículas sem tratamento térmico.

Xiangquan et al. (1997) verificaram a redução do inchamento em espessura para painéis de partículas após serem submetidos a um pós-tratamento térmico, nas temperaturas de 190°C e 220°C. Os autores observaram também uma maior efetividade do pós-tratamento térmico na redução do inchamento quando os painéis foram tratados por mais tempo.

As propriedades mecânicas dos tratamentos adicionais e dos painéis produzidos com partículas termorretificadas estão apresentadas na Tabela 30, em função da proporção.

Tabela 30. Valores médios das propriedades mecânicas dos tratamentos adicionais e dos painéis produzidos com partículas termorretificadas, em função da proporção

Proporção (%)	Adesivo	TP (MPa)	AP (N)	DJ (MPa)	CL (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
0	UF (TA1)	0,89 A	1376 A	23,78 A	8,11 A	8,93 A	837,76 A
25	UF	0,52 B	1372 A	23,12 A	6,48 B	6,31 B	678,15 B
50	UF	0,44 B	1210 B	23,08 A	5,82 B	5,50 B	645,13 B
75	UF	0,37 B	1105 B	22,24 A	5,87 B	4,71 B	624,58 B
100	UF	0,37 B	1158 B	21,80 A	5,66 B	4,37 B	611,21 B
Média	-	0,52	1244	22,80	6,39	5,96	679,37
0	UF+P(TA2)	0,91 A	1679 A	29,96 A	8,36 A	8,62 A	969,63 A
25	UF	0,52 B	1372 B	23,12 B	6,48 B	6,31 B	678,15 B
50	UF	0,44 B	1210 B	23,08 B	5,82 B	5,50 B	645,13 B
75	UF	0,37 B	1105 B	22,24 B	5,87 B	4,71 B	624,58 B
100	UF	0,37 B	1158 B	21,80 B	5,66 B	4,37 B	611,21 B
Média	-	0,52	1305	24,04	6,44	5,90	705,54
0	FF (TA3)	1,36 A	2076 A	33,83 A	8,72 A	11,39 A	1154,88 A
25	UF	0,52 B	1372 B	23,12 B	6,48 B	6,31 B	678,15 B
50	UF	0,44 B	1210 B	23,08 B	5,82 B	5,50 B	645,13 B
75	UF	0,37 B	1105 B	22,24 B	5,87 B	4,71 B	624,58 B
100	UF	0,37 B	1158 B	21,80 B	5,66 B	4,37 B	611,21 B
Média	-	0,61	1384	24,81	6,51	6,46	742,79

Legenda: UF= Uréia-formaldeído; UF+P= Uréia-formaldeído+parafina; FF= Fenol-formaldeído; TA1, TA2, TA3= Tratamentos adicionais 1, 2, 3; TP= Tração perpendicular; AP= Arrancamento de parafuso; DJ= Dureza Janka; CL= Compressão longitudinal; MOR= Módulo de Ruptura; MOE= Módulo de elasticidade.

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente do respectivo tratamento adicional pelo teste de Dunnett, a 5% de probabilidade.

Verifica-se na Tabela 30 que, de maneira geral, a adição de partículas termorretificadas teve um efeito negativo nas propriedades mecânicas dos painéis em relação aos tratamentos adicionais. Possivelmente, estes resultados estão associados à diminuição da ligação interna dos painéis produzidos com partículas termorretificadas, em decorrência das modificações dos componentes da madeira devido à degradação térmica.

Boonstra et al. (2006) avaliaram diferentes métodos de tratamento térmico de partículas de madeira para produção de painéis do tipo aglomerado. Os autores verificaram que todos os painéis produzidos com partículas termorretificadas, independente do método, apresentaram menor resistência a tração perpendicular que painéis produzidos com partículas sem tratamento.

A redução na resistência mecânica das partículas termorretificadas em decorrência da degradação térmica e a redução na taxa de compactação

também podem ter contribuído para a redução nas propriedades mecânicas dos painéis em relação aos tratamentos adicionais.

Observa-se que, para a propriedade dureza Janka, não houve diferenças significativas entre os painéis produzidos com partículas termorretificadas e o tratamento adicional 1.

Na Tabela 31 estão apresentadas as médias das propriedades mecânicas dos tratamentos adicionais e dos painéis produzidos com partículas termorretificadas, em função da temperatura.

Tabela 31. Valores médios das propriedades mecânicas dos tratamentos adicionais e dos painéis produzidos com partículas termorretificadas, em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Adesivo	TP (MPa)	AP (N)	DJ (MPa)	CL (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
25	UF (TA1)	0,89 A	1376	23,78	8,11 A	8,93 A	837,76 A
180	UF	0,46 B	1258	23,19	6,46 B	6,06 B	707,80 B
200	UF	0,42 B	1185	21,83	5,80 B	4,86 B	591,59 B
220	UF	0,40 B	1190	22,66	5,62 B	4,73 B	619,91 B
Média	-	0,46	1224	22,65	6,12	5,51	655,00
25	UF+P (TA2)	0,91 A	1679 A	29,96 A	8,36 A	8,62 A	969,63 A
180	UF	0,46 B	1258 B	23,19 B	6,46 B	6,06 B	707,80 B
200	UF	0,42 B	1185 B	21,83 B	5,80 B	4,86 B	591,59 B
220	UF	0,40 B	1190 B	22,66 B	5,62 B	4,73 B	619,91 B
Média	-	0,46	1247	23,13	6,14	5,48	665,14
25	FF (TA3)	1,36 A	2076 A	33,83 A	8,72 A	11,39 A	1154,88 A
180	UF	0,46 B	1258 B	23,19 B	6,46 B	6,06 B	707,80 B
200	UF	0,42 B	1185 B	21,83 B	5,80 B	4,86 B	591,59 B
220	UF	0,40 B	1190 B	22,66 B	5,62 B	4,73 B	619,91 B
Média	-	0,50	1278	23,43	6,17	5,70	679,39

Legenda: UF= Uréia-formaldeído; UF+P= Uréia-formaldeído+parafina; FF= Fenol-formaldeído; TA1, TA2, TA3= Tratamentos adicionais 1, 2, 3; TP= Tração perpendicular; AP= Arrancamento de parafuso; DJ= Dureza Janka; CL= Compressão longitudinal; MOR= Módulo de Ruptura; MOE= Módulo de elasticidade.

Médias ao longo das colunas seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente do respectivo tratamento adicional pelo teste de Dunnett, a 5% de probabilidade.

De acordo com a Tabela 31 observa-se que, de maneira geral, a temperatura do tratamento térmico das partículas teve um efeito negativo sobre as propriedades mecânicas dos painéis quando estabelecidas comparações com os tratamentos adicionais. Possivelmente, estes resultados estão associados à diminuição da ligação interna dos painéis produzidos com partículas termorretificadas.

Observa-se que, para os painéis produzidos com partículas tratadas a 180°C, a resistência à tração perpendicular reduziu em 50% quando comparada ao tratamento adicional 1. Esta redução foi ainda maior à medida que se aumentou a temperatura de tratamento das partículas.

Mendes (2010) verificou uma redução na resistência à tração perpendicular de 50% para painéis do tipo OSB produzidos com partículas tratadas a 200 e 240°C, em relação aos painéis produzidos com partículas sem tratamento térmico. No entanto, painéis submetidos a um pós-tratamento térmico não tiveram perda de resistência.

Conforme já explicado anteriormente, as partículas tratadas a temperaturas mais elevadas possuem menos grupamentos OH disponíveis para o desenvolvimento satisfatório da adesão, o que explica a redução na resistência à tração perpendicular. Aliado a este fato, tem-se a diminuição da taxa de compactação dos painéis produzidos com partículas termorretificadas, em decorrência do aumento da densidade destas partículas.

Verifica-se que o módulo de ruptura dos painéis produzidos com partículas termorretificadas reduziu em até 50% em relação ao tratamento adicional 1. Para o módulo de elasticidade, observa-se que a utilização de partículas termorretificadas reduziu em até 30% o módulo de elasticidade.

Estes resultados se assemelham aos encontrados por Paul et al. (2006), que obtiveram reduções de 50% e 30% para o módulo de ruptura e módulo de elasticidade, respectivamente, em painéis do tipo OSB produzidos com partículas termorretificadas. Possivelmente, a diminuição na resistência mecânica das partículas também contribuiu para a redução na resistência dos painéis à flexão.

Okino et al. (2007) e Mendes (2010) observaram que o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade de painéis do tipo OSB não foi afetado pelo pós-tratamento térmico utilizando temperaturas entre 190 e 220°C, durante 12 minutos. Sugere-se que o pós-tratamento térmico dos painéis seja menos agressivo que o pré-tratamento do painel, devido as maiores dimensões destes.

Apenas para as propriedades de dureza Janka e arrancamento de parafuso o aumento da temperatura não resultou na redução da resistência, considerando o tratamento adicional 1.

5.6. Consumo energético do torrificador rotatório

O consumo energético do torrificador rotatório está apresentado na Tabela 32, em função da temperatura do tratamento térmico. É importante ressaltar que estes valores representam o consumo de GLP para realizar o tratamento de 3 a 5 kg de partículas de madeira com teor de umidade em torno de 12%.

TABELA 32. Consumo energético do torrificador rotatório em função da temperatura

Temperatura (°C)	Consumo de GLP (g/min)
180	7,10 B
200	10,06 AB
220	14,32 A

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas não diferem significativamente entre si pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Verifica-se que, à medida que se elevou a temperatura de tratamento das partículas, aumentou-se o consumo de GLP. Observa-se também que, na temperatura de 220°C, consumiu-se o dobro de GLP em relação à temperatura de 180°C. Isso acontece porque há uma exigência maior do equipamento para manter temperaturas mais elevadas, uma vez que as perdas térmicas também aumentam consideravelmente.

O consumo de energia para se efetuar uma melhoria em algum processo produtivo é de fundamental importância, uma vez que está intrinsecamente associado ao custo do produto final. Por outro lado, o benefício associado à melhoria das propriedades deste produto deve ser considerado no preço em que este será comercializado. Desta maneira, é importante que seja avaliado o desempenho de materiais isolantes na estrutura do torrificador, com objetivo de minimizar as perdas térmicas e reduzir a taxa de consumo de GLP.

6. CONCLUSÕES

De modo geral, a adição de partículas termorretificadas melhorou a estabilidade dimensional dos painéis, porém, reduziu suas propriedades mecânicas.

O efeito da adição de partículas termorretificadas nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis foi maior quando se utilizaram temperaturas acima de 200°C.

A utilização do adesivo a base de fenol-formaldeído ou da parafina melhorou a estabilidade dimensional dos painéis. As propriedades mecânicas dos painéis produzidos com o adesivo fenólico foram superiores às dos painéis produzidos com o adesivo a base de uréia-formaldeído.

Painéis produzidos apenas com partículas termorretificadas apresentaram menor teor de umidade de equilíbrio higroscópico, adsorção de vapor d'água e inchamento em espessura do que painéis fabricados com o adesivo a base de uréia-formaldeído mais parafina.

Painéis produzidos apenas com partículas termorretificadas apresentaram menor teor de umidade de equilíbrio higroscópico e adsorção de vapor d'água do que aqueles fabricados com o adesivo a base de fenol-formaldeído. O inchamento em espessura não foi afetado.

Os resíduos de embalagens de *Pinus sp.* podem ser utilizados satisfatoriamente como matéria-prima na produção de painéis do tipo aglomerado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **Mat-formed wood particleboard: specification ANSI/A 208.1.1993**. Gaithersburg: National Particleboards Association, 1993. 9 p.

ARAÚJO, S. O., VITAL, B. R., MENDOZA, Z.M.S.H., VIEIRA, T. A., CARNEIRO, A. C. O. Propriedades de madeiras termorretrificadas de *Eucalyptus grandis* e SP. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 327-336, set. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI. **Aplicação da madeira na indústria de embalagens**. Artigo Técnico, n. 26, nov. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL – ABIB. **Potencial Brasil biomassa residual florestal e agricultura e desenvolvimento de projetos renováveis**. Disponível em: <<http://pt.calameo.com/read/00020096881b9d0dac77c>>. Acesso em: 06/08/2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS – ABRE. **Estudo macroeconômico da embalagem ABRE / FGV. Apresentação fevereiro 2012: fechamento 2011 e perspectivas para 2012**. Disponível em: <<http://www.abre.org.br/setor/dados-de-mercado/>>. Acesso em: 06/08/2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Chapas de madeira aglomerada**. ABNT. NBR 14810-1, 2, 3. Março, 2002.

BOONSTRA, M. J.; PIZZI, A.; ZOMERS, F.; OHLMEYER, M.; PAUL, W. The effects of a two stage heat treatment process on the properties of particleboard. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 64, n. 2, p. 157-164, 2006.

BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 64, n. 3, p. 204-211, 2006.

BOONSTRA, M. J.; VAN ACKER, J.; TJEERDSMA, B.; KEGEL, E. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. **Annals of forest science**, v. 64, n. 7, p. 679-690, 2007.

BOURGOIS, J.; GUYONNET, R. Characterization and analysis of torrefied wood. **Wood science and Technology**, v. 22, n. 2, p. 143-155, 1988.

BRASIL. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União - Seção 1 - Página 3, 2010.

BROSSE, N.; HAGE, R. E.; 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.

BYRNE, C. E.; NAGLE, D. C. Carbonization of Wood for Advanced Materials Applications. **Carbon**, v. 35, n. 2, p. 259-266, 1997.

CABRAL, C. P. T. **Propriedades de painéis do tipo OSB fabricados com flocos esterificados**. 2010. 103 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

CÉSAR, A. A. S. **Estudo da interação adesivo-partícula em painéis OSB (Oriented Strand Board)**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011.

DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS – UK. Packaging waste and producer responsibility. Disponível em: <<http://www.defra.gov.uk/environment/waste/business/packaging-producer/>>. Acesso em: 10/08/2012.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – U.S. **Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Detailed Tables and Figures for 2008**. Nov. 2009. Disponível em: <<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/msw2008data.pdf>>. Acesso em: 08/08/2012.

ESTEVES, B. M., DOMINGOS, I. J.; PEREIRA, H. M. Pine wood modification by heat treatment in air. **BioRes**. 3(1), p. 142-154, 2008b.

ESTEVES, B.; GRACA, J.; PEREIRA, H. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, v. 62, n. 3, p. 344-351, 2008a.

ESTEVES, B.; PEREIRA, H. Wood modification by heat treatment: a review. **BioRes**, v. 4, n.1, p. 370-404, 2009.

ESTEVES, B.; VIDEIRA, R.; PEREIRA, H. Chemistry and ecotoxicity of heat-treated pine wood extractives. **Wood Science and Technology**, v. 45, n. 4, p. 661-676, 2011.

FONSECA, Y. M. D. F., RIBEIRO, M. C.; NASCIMENTO, M. C. P. Bolsa de resíduos em Minas Gerais e em outros estados do Brasil. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 26 (AIDIS 98), 1998, Lima. **Anais...** Lima: APIS, 1998. p. 1-12.

GALEMBECK, F.; GANDUR, M. C. **Cientistas explicam o fenômeno da adesão**. Química e Derivados. v. 393, p. 24-32, 2001.

GEIMER, R. L. Steam injection pressing. In: MALONEY, THOMAS M., ED. PROCEEDINGS OF THE 16TH WASHINGTON STATE UNIV, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PARTICLEBOARD, 1982, Pullman, Washington. **Annals...** Pullman, Washington, 1982. p. 115-134.

GIRARD P.; SHAH N. Developpement of torrefied wood, an alternative to charcoal for reducing deforestation. **Technical Series**, v. 20, p. 101-114,1991.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Eds) **Lignins**. New York: Wiley Interscience, 1971. p. 241-266.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O papel**, v. 47, n.8, p.36-38, 1986.

GOROYIAS, G.J.; HALE, M.D.C. **Heat treatment of wood strands for OSB production: effect on the mechanical properties, water absorption and dimensional stability**. Cardiff: International Research Group on Wood Protection, 2002, 1 p.

GRØNLI, M. G.; VÁRHEGYI, G.; DI BLASI, C. Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 41, n. 17, p. 4201-4208, 2002.

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.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; GÉRARDIN, P.; ZOULALIAN, A. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. **Polymer Degradation and Stability**, v. 89, n. 1, p. 1-5, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Industrial – 2010**. Rio de Janeiro, v. 29, n.2, 186 p., 2010.

IRLE, M.; BARBU, M. C. Wood-Based Panel Technology. In: THOEMEN, H. IRLE, M.; SERNEK, M. **Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists**. London: Brunel University Press, 2010, 287 p.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 2005, 254 p.

IWAKIRI, S.; CUNHA, A. B.; ALBUQUERQUE, C. E. C.; GORNIK, E.; MENDES, L. M. Resíduos de serrarias na produção de painéis de madeira aglomerada de eucalipto. **Scientia Agraria**, v.1, n. 1-2, p. 23-28, 2000.

IWAKIRI, S.; DE ALBUQUERQUE, C. E. C.; PRATA, J. G.; COSTA, A. C. B. Utilização de madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* para produção de painéis de partículas orientadas–OSB. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 2, 2008.

IWAKIRI, S.; SILVA, J. R. M.; MATOSKI, S. L. S.; LEONHADT, G.; CARON, J. Produção de chapas de madeira aglomerada de cinco espécies de pinus tropicais. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 137-142, 2001.

JENNINGS, J. D. **Investigating the Surface Energy and Bond Performance of Compression Densified Wood**. Dissertation (Master of Science in Wood Science and Forest Products). Virginia: Polytechnic Institute and State University, 2003.

KAMDEM, D. P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. Durability of heat-treated wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 60, n. 1, p. 1-6, 2002.

KELLY, M. W. Critical Literature Review of Relationships Between Processing Parameters and Physical Properties of Particleboard. **USDA Forest Service General Technical Reports**, FPL, v. 10, 65p. 1977.

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; DORÉ, G.; YOUNSI, R. Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 66, n. 5, p. 355-361, 2008.

LUENGO, C. A.; FELFLI, F. E. F.; BEZZON, G. **Tecnologias de Conversão Energética de Biomassa**. Capítulo X - Pirólise e torrefação de biomassa. 1 ed. Manaus, AM: Editora da Universidade do Amazonas, 1997. 527 p.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman Inc., 1993, 688 p.

MATOS, J. L. M. **Ciclo de prensa em chapas de partículas estruturais "Waferboards"**. 1988. 163 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1988.

MBURU, F.; DUMARÇAY, S.; BOCQUET, J. F.; PETRISSANS, M.; GÉRARDIN, P. Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of *Grevillea robusta* wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 93, n. 2, p. 401-405, 2008.

MEDVED, S. Thermal modification of particleboard for dimensional stable product. In: PROCESSING TECHNOLOGIES FOR THE FOREST AND BIOBASED PRODUCTS INDUSTRIES, 2010, Kuchl/Austria. **Annals...** Kuchl/Austria: Salzburg University of Applied Sciences, 2010. p. 183-185.

MENDES, L. M. *Pinus spp.* na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, 2002.

MENDES, R. F. **Efeito do tratamento térmico sobre as propriedades de painéis OSB**. 2010. 116 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, 2010.

MENDOZA, Z. M. S. H. **Efeito da inclusão laminar nas propriedades de painéis aglomerados fabricados com resíduos da indústria laminadora.** 2010. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

MITCHELL, R.L., SEBORG, R.M., MILLET, M.A., Effect of heat on de properties and chemical composition of Douglas-fir Wood and its major components. **Journal of the forest products Research Society**, v.3, n.4, p.38-42, 1953.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard: materials - v.1.** London: Southern University Press, 1974, 244 p.

NAUMANN, R. B.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; DELLA LUCIA, R. M.; SILVA, J. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLLI, A. Propriedades de chapas fabricadas com partículas de madeira de *Eucalyptus urophylla* ST Blake e de *Schizolobium amazonicum* Herb. **Revista Árvore**, v. 32, n. 6, p. 1143-1150, 2008.

NUOPPONEN, M.; VUORINEN T.; JÄMSÄ S.; VIITANIEMI P. The effects of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods. **Wood Science and Technology**, v. 37, n.2, p. 109-115, 2003.

NUOPPONEN, M.; VUORINEN, T.; JAMSÄ; S.; VIITANIEMI, P. Thermal Modifications in Softwood Studied by FT-IR and UV Resonance Raman Spectroscopies. **Journal of wood chemistry and technology**, v. 24, n. 1, p. 13-26, 2005.

OKINO, E.Y.A.; TEIXEIRA, D.E.; DEL MENEZZI, C.H.S. Post-thermal treatment of oriented strandboard (OSB) made from cypress (*Cupressus glauca* Lam.). **Maderas Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 9, n. 3, p. 199-210, 2007.

PAUL, W.; OHLMEYER, M. Modified Wood-Based Panels. In: THOEMEN, H. IRLE, M.; SERNEK, M. **Wood-Based Panels: An Introduction for Specialists.** London: Brunel University Press, 2010, 287 p.

PAUL, W.; OHLMEYER, M.; LEITHOFF, H.; BOONSTRA, M. J.; PIZZI, A. Optimising the properties of OSB by a one-step heat pre-treatment process. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 64, n. 3, p. 227-234, 2006.

PEDRAZZI, C.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; SCHNEIDER, P. R. Qualidade de chapas de partículas de madeira aglomerada fabricadas com resíduos de uma indústria de celulose. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 2, 2006.

PEREIRA, F. A. **Propriedades de painéis tipo OSB, fabricados com flocos de *Eucalyptus grandis* tratados termicamente.** 2013. 81 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

PEREYRA, O. **Avaliação da madeira de *Eucalyptus dunnii* (Maid) na manufatura de painéis compensados**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 1993.

PÉTRISSANS, M.; PHILIPPE, G.; EL BAKALI, I.; SERRAJ, M. Wettability of heat-treated wood. **Holzforschung**, v. 57, n. 3, p. 301-307, 2003.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of Adhesive Technology**. New York: Marcell Dekker, 1994. 680p.

PONCSÁK, S.; KOCAEFE, D.; BOUAZARA, M.; PICHETTE, A. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 8, p. 647-663, 2006.

ROQUE, C. A.; VALENÇA, A. C. **Painéis de madeira aglomerada**. Publicações do BNDES, 1998. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set805.pdf>. Acesso em: 07/08/2012.

SANTANA, M. A. E.; PASTORE, J. F. **Adesivo de tanino-formaldeído para aglomerados**. Brasília: Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, 1981. (Série Técnica, 2).

SERNEK, M.; KAMKE, A.F.; GLASSER, W.G. Comparative analysis of inactivated wood surface. **Holzforschung**, Berlin, v. 58, p. 22–31, 2004.

SERVIÇO MUNICIPAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL DE SANTO ANDRÉ - SEMASA. **Projeto de usina de reciclagem e recuperação de madeira**. 2005. Disponível em: <http://www.semasa.sp.gov.br/admin/biblioteca/docs/pdf/Reciclagem_e_recupera%C3%A7%C3%A3o_de_madeiras.pdf>. Acesso em: 08/08/2012.

SHEN, K. C. Steam-press process for curing phenolic-bonded particleboard. **Forest Products Journal**, v. 23, n. 3, p. 21-29, 1973.

SILVA, J. C. **Aglomerado: características, propriedades e usos**. 2000. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2000.

SISTEMA INTEGRADO DE BOLSA DE RESÍDUOS - SIBR. Disponível em: <<http://www.sibr.com.br/>>. Acesso em: 08/08/2012.

SOARES, A. C.; OLIVEIRA, R. M.; BRISOLARI, A.; SALES, A.; GONÇALVES, D. Molhabilidade em amostras de *Araucaria angustifolia* e *Pinus elliottii* após tratamento térmico e envelhecimento. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 447-456, 2011.

STAMM, A. J.; BURR, H. K.; KLINE, A. A. Staywood – heat-stabilized wood. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 38, n. 6, p. 630-634, 1946.

SUNDQVIST, B.; KARLSSON, O.; WESTERMARK, U. Determination of formic-acid and acetic acid concentrations formed during hydrothermal treatment of birch wood and its relation to colour, strength and hardness. **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 7, p. 549-561, 2006.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. **Sampling and preparing wood for chemical analysis - TAPPI T257 cm-02**. Atlanta: Tappi Press, 2002.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. **Solvent extractives of wood and pulp - TAPPI T 204 cm-97**. Atlanta: Tappi Press, 1997.

TJEERDSMA, B. F.; MILITZ, H. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 63, n. 2, p. 102-111, 2005.

TJEERDSMA, B. F.; BOONSTRA, M. J.; PIZZI, A.; TEKELY, P.; MILITZ H. Characterization of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 56, p.149-153, 1998.

TREATEDWOOD BRAZIL – TWBRAZIL. **Madeira Modificada Com Calor TMT** (Thermally Modified Timber), Apresentação resumida. Ficha técnica do produto. Ponta Grossa, Paraná, Brasil. 7p. 2010.

VERNOIS, M. Heat treatment of wood in France—state of the art. In: PROCEEDINGS OF SPECIAL SEMINAR “REVIEW ON HEAT TREATMENTS OF WOOD”, 2001, Paris/France. **Annals...** Paris/France: Centre Technique du Bois et de l’Ameublement, 2001.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21p.

VITAL, B. R.; HASELEIN, C. R.; DELLA LUCIA, R. M. Efeitos da geometria das partículas nas propriedades das chapas de madeira aglomerada de *Eucalyptus grandis* (Hill ex- maiden). **Revista Árvore**, Viçosa, v.16, n. 1, p. 88-96, jan-abr 1992.

VITAL, B. R.; LEHMANN, W. F.; BOONE, R. S. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. **Forest Products Journal**, v. 24, n. 12, p. 37-45, 1974.

VITAL, B. R.; TRUGILHO, P. F. Variação dimensional e uso da madeira de *Eucalyptus*. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 18, n. 186, p. 57-61. 1997.

WIECHETECK, M. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/publicacao/164_publicacao10012011033501.pdf>. Acesso em 07/08/2012.

WIKBERG, H.; MAUNU, S. Characterisation of thermally modified hard- and softwoods by ¹³C CP/MAS 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.

XIANGQUAN, Z.; RENSHU, L.; WEIHONG, W.; ANBIN, P. Heat post-treatment to reduce thickness swelling of particleboard from fast-growing poplars. **Journal of Forestry Research**, v. 8, n. 3, p. 188-190, 1997.

YOUNGQUIST, J. A. **Wood handbook—Wood as an engineering material.** Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999, 463 p.

ZUGMAN, I. C. Painei geral sobre a produção de compensados. **Revista Silvicultura**, ano XV(55), p.12-18, mai/jun., 1994.