

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**EFEITO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE
DENSIFICAÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES DE
COMPENSADOS E PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS DE
PARICÁ (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke)**

MÍRIAN DE ALMEIDA COSTA

ORIENTADOR: CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI

TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: PPGEFL.TD – 054/2015
BRASÍLIA/DF: ABRIL – 2015

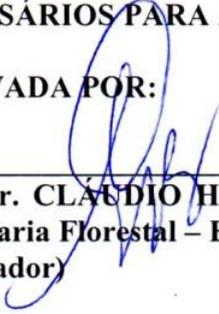
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**“EFEITO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE DENSIFICAÇÃO SOBRE AS
PROPRIEDADES DE COMPENSADOS E PAINÉIS DE LÂMINAS
PARALELAS DE PARICÁ (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke)”**

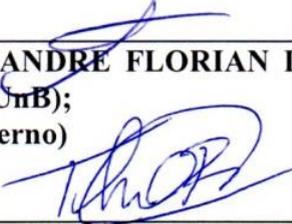
MIRIAN DE ALMEIDA COSTA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADA POR:



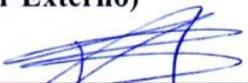
**Profº Dr. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Orientador)**



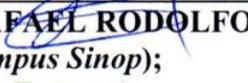
**Profº Dr. ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Examinador Interno)**



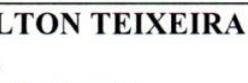
**Profº Dr. THIAGO OLIVEIRA RODRIGUES (Fundação de Tecnologia Florestal e Geoprocessamento – FUNTEC/DF);
(Examinador Externo)**



**Profº Dr. DIVINO ETERNO TEIXEIRA (Serviço Florestal Brasileiro – SFB/MMA);
(Examinador Externo)**



**Profº Dr. RAFAEL RODOLFO DE MELO (Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT/Campus Sinop);
(Examinador Externo)**



**Profº Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB).
(Examinador Suplente)**

Brasília-DF, 30 de abril de 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, MÍRIAN DE ALMEIDA

Efeito de diferentes estratégias de densificação sobre as propriedades de compensados e painéis de lâminas paralelas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke). 2015.

148p., 210 x 297 mm (EFL/FT/UnB), Doutor, Tese de Doutorado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Florestal.

1.Tratamento termomecânico

2.Densificação

3.Compensado

4. Pannel de lâminas paralelas

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, M. A. (2015). Efeito de diferentes estratégias de densificação sobre as propriedades de compensados e painéis de lâminas paralelas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke). Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.TD - 054/2015, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 148p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Mírian de Almeida Costa.

TÍTULO: Efeito de diferentes estratégias de densificação sobre as propriedades de compensados e painéis de lâminas paralelas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke).

GRAU: Doutor

ANO: 2015

É concedida a Universidade de Brasília e quem mais interessar, a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Mírian de Almeida Costa

Rua das Figueiras, lote 05, Águas Claras.

CEP 71906-750 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

À Deus e minhas entidades protetoras por iluminarem meus caminhos, me darem força e determinação para alcançar este grande objetivo;

Aos meus pais, Ivanovitch Ribeiro Costa e Julieta Costa de Almeida, e às minhas irmãs, Rita e Julia, por todo o amor, carinho, compreensão e incentivo;

Ao meu marido Ricardo, por estar sempre ao meu lado nos momentos difíceis, e com todo amor, paciência e compreensão tornou essa trajetória mais leve e menos estressante;

Ao professor Cláudio Henrique Soares Del Menezzi, pela valiosa orientação, pelo incentivo e confiança depositada antes e durante o desenvolvimento do trabalho; agradeço pela ajuda, dedicação e exemplo de profissional;

Aos funcionários do Laboratório de Produtos Florestais, que me ajudaram em todas as etapas do desenvolvimento desse trabalho, além de me proporcionarem momentos de descontração;

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília (UnB), pelos ensinamentos, auxílio e conselhos durante minha pós-graduação;

À Universidade de Brasília (UnB) pela oportunidade de desenvolver esta tese;

À CAPES pelo suporte financeiro;

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

Aos meus pais,

Julieta Costa de Almeida e

Ivanovitch Ribeiro Costa

Às minhas irmãs,

Rita de Almeida Costa e

Julia de Almeida Costa

Ao meu marido

Ricardo Mesquita Muniz

Dedico este
trabalho.

RESUMO

EFEITO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE DENSIFICAÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES DE COMPENSADOS E PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS DE PARICÁ (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke)

Autora: Mírian de Almeida Costa

Orientador: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais

Brasília, abril de 2015.

Este trabalho objetivou avaliar possíveis alterações com relação às propriedades físicas e mecânicas de compensados e painéis de lâminas paralelas (LVL – *laminated venner lumber*) produzidos com a madeira de paricá, que foram tratados termomecanicamente. Compensados de duas espessuras diferentes foram testados, e nos de 12 mm de espessura, foram analisadas duas temperaturas (120°C e 150°C), dois tempos sob pressão (7 e 12 minutos) e dois tempos sem pressão (15 e 30 minutos) num total de oito tratamentos. Nos compensados de 20 mm de espessura, foram analisadas duas temperaturas (120°C e 150°C), num total de dois tratamentos. Nos LVLs, foram analisados dois níveis de pressão (25% e 50% da resistência à compressão perpendicular do paricá), num total de dois tratamentos. Propriedades físicas e mecânicas dos painéis tratados foram comparadas com as propriedades de painéis não-tratados (testemunha). Os resultados indicaram que em todos os materiais a densificação não proporcionou melhorias na estabilidade dimensional, em comparação com a testemunha. As propriedades mecânicas dos compensados melhoraram, enquanto que as dos LVLs não foram significativamente afetadas. A temperatura foi o fator mais importante para as alterações nas propriedades físicas e mecânicas dos compensados.

Palavras-chave: densificação, compensado, painéis de lâminas paralelas, *Schizolobium amazonicum*.

ABSTRACT

EFFECTS OF DIFFERENT STRATEGIES OF DENSIFICATION ON PROPERTIES OF PARICA (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) PLYWOOD AND LVL

Author: Mírian de Almeida Costa

Advisor: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais

Brasília, abril de 2015.

The work aimed at evaluating the densification effects on physical and mechanical properties of plywood and LVL boards produced with veneers of *Schizolobium amazonicum* wood. Two temperatures (120°C and 150°C), two times under pressure (7 and 12 minutes) and two times with no pressure (15 and 30 minutes) were evaluated on the 12 mm-thick plywood, corresponding to a total of 8 treatments. Two temperatures (120°C and 150°C) were evaluated on the 20 mm-thick plywood, corresponding to a total of 2 treatments. Two pressure levels (25% and 50% of parica perpendicular compression strength) were evaluated on the LVL panels, corresponding to a total of 2 treatments. Physical and mechanical properties of the treated panels were analysed, and the results were compared with the properties of untreated panels. The results indicated that treatment did not improved the dimensional stability of any treated material, in comparison with the non-treated panels. The mechanical properties on both types of plywoods had been improved, while LVL mechanical properties had not been significantly affected by the thermomechanic treatment. The temperature of treatment was the most important factor in the alterations of the physical and mechanical properties of plywood.

Key words: densification, plywood, LVL, *Schizolobium amazonicum*.

SUMÁRIO

DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.2 HIPÓTESE	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 A ESPÉCIE <i>Schizolobium amazonicum</i> (Huber ex Ducke).....	5
2.2 PROPRIEDADES DA MADEIRA DE PARICÁ E SEUS USOS	7
2.3 COMPÓSITOS E PAINÉIS ESTRUTURAIS DE MADEIRA.....	8
2.3.1 O painel de compensado	10
2.3.2 O painel de lâminas paralelas (<i>Laminated Venner Lumber - LVL</i>)	13
2.4 TRATAMENTO TÉRMICO.....	17
2.5 DENSIFICAÇÃO DA MADEIRA.....	19
2.5.1 Polímeros amorfos da madeira.....	22
2.6 ESTABILIZAÇÃO DA MADEIRA	25
2.7 ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	27
2.8 ALTERAÇÕES NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA	31
2.9 ALTERAÇÕES EM OUTRAS PROPRIEDADES.....	33
2.10 CUSTOS.....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

CAPÍTULO 1:

EFEITO DA DENSIFICAÇÃO PÓS-PRODUÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES DE COMPENSADOS DE PARICÁ (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke)

1. INTRODUÇÃO	50
2. MATERIAIS E MÉTODOS	51
2.1 TRATAMENTO TERMOMECÂNICO	51
2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	52
2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS	54
2.4 ANÁLISE DOS DADOS	56
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
3.1 PAINÉIS COMPENSADOS DE 12 MM DE ESPESSURA	56
3.1.1 Massa específica e Taxa de Compressão	56
3.1.2 Temperatura x Tempo	58
3.1.3 Propriedades Físicas.....	60
3.1.4 Propriedades Mecânicas	66
3.2 PAINÉIS COMPENSADOS DE 20 MM DE ESPESSURA.....	70
3.2.1 Massa Específica e Taxa de Compressão	70
3.2.2 Temperatura x Tempo.....	71
3.2.3 Propriedades Físicas.....	73
3.2.4 Propriedades Mecânicas.....	75

4. CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

CAPÍTULO 2:

EFEITO DA DENSIFICAÇÃO DURANTE A Prensagem SOBRE AS PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS DE PARICÁ (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke)

1. INTRODUÇÃO	83
2. MATERIAIS E MÉTODOS	85
2.1 CONFECÇÃO DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS	85
2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS	86
2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS	88
2.4 ANÁLISE DOS DADOS	89
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
3.1 MASSA ESPECÍFICA E TAXA DE COMPRESSÃO DOS LVLs	90
3.2 TEMPERATURA X TEMPO	91
3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS LVLs	92
3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS	97
4. CONCLUSÕES	101
CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
CONCLUSÕES GERAIS	102
RECOMENDAÇÕES	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
APÊNDICE 1	107
APÊNDICE 2	112
APÊNDICE 3	117
APÊNDICE 4	123
APÊNDICE 5	126
APÊNDICE 6	128
APÊNDICE 7	130
APÊNDICE 8	133
APÊNDICE 9	135

LISTA DE FIGURAS

DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO

Figura 1. Plantio de paricá com 2 anos 6 meses e espaçamento 4 x 4. Diâmetro de um indivíduo de 5 anos de idade após o abate (27 cm). Fonte: Siviero (2009).....	5
Figura 2. Disposição dos elementos de vaso e raios (a), composição dos raios (b) e arranjo das pontuações (c), da madeira de paricá aos 6 anos de idade. Fonte: Terezo (2010).	7
Figura 3. Exemplos de compósitos estruturais de madeira. Da esquerda para a direita: glulam, PSL, viga em “I”, LVL e PSL. Fonte: Shmulsky e Jones, 2011.	9
Figura 4. Madeira de tulipeiro (<i>Yellow poplar</i>) não tratada (esquerda) e a mesma espécie após o processo VTC (direita). Fonte: Kamke (2006).....	20
Figura 5. Variação no módulo de elasticidade de um polímero amorfo de acordo com a temperatura. Fonte: Sandberg e Navi (2007).	23
Figura 6. Temperatura de transição vítrea dos componentes isolados da madeira em função do teor de umidade. Fonte: Salmén (1982).	24
Figura 7. Esquema da densificação da madeira em nível celular, recuperação e diferentes métodos para fixar a compressão. Fonte: Sandberg et al. (2013).	27
Figura 8. Falhas nas paredes celulares de Douglas-fir (<i>Pseudotsuga</i> sp.) por compressão quente.. Fonte: Geimer et al. (1985).	28
Figura 9. Esquema do inchamento em espessura de madeiras comprimidas. Fonte: Arruda (2012).	30

CAPÍTULO 1

Figura 1. Evolução da temperatura interna durante os tratamentos termomecânicos nos compensados de 12 mm.	59
Figura 2. Efeito da interação entre a temperatura e o tempo à pressão zero no inchamento em espessura em 2h e 24h dos compensados de 12 mm.	65
Figura 3. Efeito da interação entre a temperatura e o tempo sob pressão no módulo de ruptura (f_M) e no módulo de elasticidade (E_M) dos compensados de 12 mm.....	69
Figura 4. Evolução da temperatura interna durante os tratamentos termomecânicos nos compensados de 20 mm. Tratamento 1: 120°C, 7', 15'; Tratamento 2: 150°C, 7', 15'.....	72

CAPÍTULO 2

Figura 1. Evolução da temperatura no interior dos LVLs.	92
--	----

LISTA DE TABELAS

DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO

Tabela 1. Alterações na madeira com o aumento da temperatura.	18
Tabela 2. Temperatura de transição vítrea dos constituintes da madeira segundo diferentes autores.....	23

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Tratamentos termomecânicos aplicados nos compensados de 12 mm.....	51
Tabela 2. Valores médios de massa específica (ME) e taxa de compressão (TC) das testemunhas e das amostras de compensado de 12 mm tratadas termomecanicamente.....	57
Tabela 3. Propriedades físicas dos compensados de 12 mm.	60
Tabela 4. Eficiência (%) do tratamento sobre as propriedades de estabilidade dimensional dos compensados de 12mm.	63
Tabela 5. Efeito isolado das variáveis temperatura e dos tempos sob pressão e após pressão sobre as propriedades físicas dos compensados de 12 mm.	64
Tabela 6. Valores das propriedades mecânicas dos compensados de 12 mm.	66
Tabela 7. Eficiência (%) do tratamento termomecânico sobre as propriedades mecânicas dos compensados de 12 mm.	68
Tabela 8. Efeito isolado das variáveis temperatura e dos tempos sob pressão e após pressão sobre as propriedades mecânicas dos compensados de 12 mm.....	69
Tabela 9. Tratamentos termomecânicos aplicados nos compensados de 20 mm.....	70
Tabela 10. Massa específica (ME) e taxa de compressão (TC) das testemunhas e das amostras de compensado de 20 mm tratadas.....	71
Tabela 11. Propriedades de estabilidade dimensional dos compensados de 20 mm.....	73
Tabela 12. Eficiência (%) do tratamento sobre as propriedades de estabilidade dimensional dos compensados de 20 mm.	75
Tabela 13. Efeito da temperatura sobre as propriedades físicas dos compensados.....	75
Tabela 14. Valores das propriedades mecânicas dos compensados de 20 mm.	76
Tabela 15. Eficiência do tratamento sobre as propriedades mecânicas dos compensados..	77
Tabela 16. Efeito da temperatura sobre as propriedades mecânicas dos compensados.	77

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Propriedades da resina fenol-formol HL-7090 HS e formulação do adesivo utilizado na confecção dos painéis LVL.	85
Tabela 2. Tratamentos termomecânicos aplicados nos painéis LVL.	86
Tabela 3. Massa específica (ME) e taxa de compressão (TC) das testemunhas e das amostras de LVLs.....	90
Tabela 4. Propriedades de estabilidade dimensional dos painéis LVLs.....	93
Tabela 5. Eficiência (%) do tratamento sobre as propriedades de estabilidade dimensional dos painéis LVLs.	96
Tabela 6. Efeito da pressão sobre as propriedades físicas dos painéis LVLs.....	97
Tabela 7. Valores das propriedades mecânicas dos painéis LVLs.....	97
Tabela 8. Eficiência (%) do tratamento sobre as propriedades mecânicas dos LVLs.....	100
Tabela 9. Efeito da pressão sobre as propriedades mecânicas dos painéis LVLs.	100

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	- Corpo-de-prova
UnB	- Universidade de Brasília
EFL	- Departamento de Engenharia Florestal
SCL	- <i>Structural Composite Lumber</i>
FPL	- <i>Forest Products Laboratory</i>
Glulam	- <i>Glued Laminated Timber</i>
MLC	- Madeira Laminada Colada
LVL	- <i>Laminated Veneer lumber</i>
LVL	- Painel Estrutural de Lâminas Paralelas
OSL	- <i>Oriented Strand lumber</i>
LSL	- <i>Laminated Strand lumber</i>
PSL	- <i>Parallel Strand Lumber</i>
OSB	- <i>Oriented Strand board</i>
MDF	- <i>Medium Density Fiberboard</i>
E_M	- Módulo de Elasticidade
f_M	- Módulo de Ruptura
$f_{v,0}$	- Resistência ao Cisalhamento Paralelo
f_H	- Dureza Janka
ABS	- Absorção de Água (%)
IE	- Inchamento em Espessura (%)
TNRE	- Taxa de Não-Retorno (%)
ME	- Massa Específica (g/cm^3)
PM	- Perda de Massa (%)
g/cm^3	- Unidade de Medida para Massa Específica
g/m^2	- Unidade de Medida para Gramatura de Adesivo
N/mm^2	- Unidade de Medida para as Propriedades Mecânicas
MPa	- Unidade de Medida para as Propriedades Mecânicas

1. INTRODUÇÃO

Existe um interesse crescente no desenvolvimento e utilização de diversas tecnologias de modificação da madeira. Este interesse é devido ao anseio de melhorar as suas propriedades – como a resistência ao ataque de microrganismos e maior estabilidade dimensional – porém sem dispor do uso de substâncias químicas, que muitas vezes são tóxicas para os humanos e para o meio ambiente (HILL et al., 2012). Portanto, a modificação da madeira pode ser considerada uma técnica que melhora as propriedades da madeira, e/ou dos produtos de madeira, produzindo um material que não causa danos ao meio ambiente (HILL, 2006).

O tratamento térmico da madeira, ou termorretificação, é conhecido há muito tempo como um meio de modificar a madeira e inclui diversos métodos. Seu maior objetivo é obter maior estabilidade dimensional, melhoria na resistência mecânica e à deterioração biológica, e é feito normalmente em condições de vácuo, na presença de ar ou ainda com um gás inerte, como o nitrogênio.

Neste sentido observa-se que o tratamento térmico provoca alterações benéficas em algumas propriedades da madeira. Quando ela é aquecida sob determinadas condições de temperatura, tempo e umidade podem ocorrer alterações ditas permanentes. Nessas condições a madeira termicamente tratada pode apresentar alterações de propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e resistência biológica. Essas alterações são provocadas principalmente em função da degradação térmica dos componentes químicos da madeira e também pela mudança de suas estruturas químicas, além de ocorrer alterações na morfologia dos componentes anatômicos (DEL MENEZZI, 2004).

A madeira é um material altamente higroscópico, e Burger e Richter (1991) explicaram os fenômenos de contração e inchamento pela dessorção ou adsorção de umidade apresentados pelo material. A entrada de água entre as moléculas de celulose da parede celular provoca o afastamento das mesmas e, como consequência, o inchamento. O processo contrário produz a aproximação das moléculas de celulose, resultando na contração da madeira (TAKESHITA, 2011).

O tratamento ideal para a redução da higroscopicidade seria remover os grupos hidroxila dos polímeros da parede celular e, portanto, remover as ligações dos polímeros com a água. A retirada do grupo hidroxila é teoricamente possível através das reações químicas de redução, no entanto o tratamento destruiria a madeira. Os tratamentos térmicos são uma alternativa para reduzir esta higroscopicidade, mas ainda promove certo nível de degradação na madeira (ROWELL e BANKS, 1985).

Além dos tratamentos térmicos, outra metodologia para modificação da madeira e dos produtos de madeira são os tratamentos termomecânicos (TM), onde é densificada por meio do calor e da compressão mecânica aplicada perpendicularmente às fibras, que conduzidos em diversas combinações de tempo, temperatura e pressão aumentam a massa específica da madeira e assim melhoram algumas de suas propriedades. Skyba (2008) afirmou que as propriedades mecânicas melhoram proporcionalmente de acordo com a intensidade da densificação e a madeira densificada é empregada em circunstâncias onde a resistência à fadiga é importante, como em *finger joints* e pisos de madeira.

As desvantagens da madeira densificada são o custo geralmente alto e a limitação da sua disponibilidade em dimensões maiores. Além disso, é um produto dimensionalmente instável. A recuperação da espessura após entrar em contato com a umidade é um problema que muitos autores têm tentado resolver ou pelo menos amenizar. Sabe-se que os materiais densificados tendem a liberar a tensão de compressão acumulada, e isto ocorre ao absorverem a umidade. Assim, o inchamento total em espessura é a soma do inchamento natural da madeira – por ser um material higroscópico – e o inchamento causado pela liberação da tensão de compressão (ARRUDA; DEL MENEZZI, 2013).

O tratamento TM também é uma oportunidade para que as madeiras leves e porosas se tornem mais densas e que possam ser utilizadas em situações onde é necessária maior resistência. Da mesma forma, pode-se usar esse tratamento em lâminas de madeira usadas para confecção de compensados e LVL (painel de lâminas paralelas). A prévia densificação das lâminas pode reduzir o tempo de prensagem total do painel e a quantidade de adesivo empregada, além de melhorar as propriedades mecânicas do material finalizado (ARRUDA, 2012; ARRUDA et al., 2011; FANG et al., 2012).

O tratamento TM também pode ser aplicado durante ou depois da consolidação do painel, tornando-o menos higroscópico, mais hidrofóbico e mais resistente ao ataque biológico (CURRIER, 1962; HAYGREEN e DANIELS, 1969). A aplicação de calor em madeira que já passou por um processo de secagem e em produtos acabados é tema de vários estudos. Nesse tipo de tratamento a madeira já foi seca e alguma alteração em função

disso pode ter ocorrido. Sendo assim, o objetivo da aplicação de calor é modificar o comportamento da madeira já processada, permitindo um melhor desempenho em sua utilização (DEL MENEZZI, 2004).

A justificativa para a realização deste trabalho é que tratamentos termomecânicos podem ajudar a melhorar a qualidade do produto final, podendo ser utilizado tanto como um pré-tratamento, como no pós-tratamento. Eles reduzem a instabilidade dimensional da madeira e de produtos provenientes dela, porque reduzem o teor de umidade e absorção de líquidos, além de os tornarem mais resistentes mecanicamente.

Pouca literatura pode ser encontrada sobre pós-tratamentos termomecânicos aplicados em painéis estruturais no intuito de aumentar a massa específica e assim melhorar suas propriedades mecânicas. Essas melhorias ocorrem não só devido às mudanças físicas que ocorrem na madeira durante o tratamento, mas também pela degradação dos seus componentes químicos amorfos induzida pelo processo de compressão a elevadas temperaturas. Neste contexto, este trabalho visa a apurar o efeito da densificação de painéis compensados e LVLs confeccionados com lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum*), uma espécie nativa tropical de fácil processamento e grande potencial para produção de lâminas (FIGUEROA, 2008; IWAKIRI et al., 2010).

Por se tratar de uma espécie de madeira tropical nativa, o paricá (*Schizolobium amazonicum*) tem ganhado nos últimos anos muito destaque na mídia nacional. Além disso, muitos fatores têm propiciado a intensificação dos plantios, entre eles a elevada aceitação comercial e os elevados preços dos produtos manufaturados. Existem trabalhos que avaliam o desempenho da madeira de paricá como matéria-prima para a produção de painéis compensados e LVL (MELO, 2012; IWAKIRI et al., 2010; ARRUDA et al., 2011), porém no âmbito da densificação termomecânica, nada foi encontrado na literatura sobre a influência deste tipo de tratamento sobre as propriedades físicas e mecânicas de painéis produzidos a partir desta madeira.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é investigar a influência de diferentes tratamentos termomecânicos sobre os compensados de paricá (*Schizolobium amazonicum*) e sobre os LVLs produzidos com lâminas desta espécie.

1.2 HIPÓTESE

As estratégias de densificação propostas no trabalho vão melhorar as propriedades mecânicas tanto dos compensados como dos painéis de lâminas paralelas, permitindo que estes materiais sejam utilizados em fins estruturais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A ESPÉCIE *Schizolobium amazonicum* (Huber ex Ducke)

A espécie é conhecida na Região Amazônica como paricá, bandarria ou guapuruvu-da-amazônia. Ocorre naturalmente na Amazônia Brasileira, no Peru e na Colômbia, em mata primária e mata secundária de terra firme e várzea alta. A árvore de grande porte assemelha-se bastante ao *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake (guapuruvu), principalmente no que se refere ao crescimento e ao emprego de sua madeira (COSTA et al., 1998). Por apresentar rápido crescimento, fuste reto com ramificação a partir de sete metros (Figura 1) e madeira com elevada cotação no mercado interno e externo, o paricá vem sendo bastante cultivado pelas empresas madeireiras e utilizado em plantios na Região Amazônica para recuperar áreas degradadas (COSTA et al., 1998).



Figura 1. Plantio de paricá com 2 anos 6 meses e espaçamento 4 x 4. Diâmetro de um indivíduo de 5 anos de idade após o abate (27 cm). Fonte: Siviero (2009).

A partir da década de 90, começaram a implantação de pequenas áreas de plantios concentrados principalmente no Estado do Pará, na região de Paragominas, visando o seu aproveitamento industrial, para a produção de lâminas para a manufatura de painéis compensados. Hoje, o paricá é a espécie nativa mais plantada em alguns estados da Amazônia¹. A idade média de corte é de apenas 7 anos, com alto rendimento na laminação em razão da pequena quantidade de defeitos presentes na madeira. Aliado a essas vantagens naturais da espécie, o desenvolvimento de tecnologias apropriadas para a laminação do paricá despertou o interesse por plantios em larga escala (VIDAURRE, 2010).

Costa et al. (1998) citam que as sementes da espécie apresentam excelente poder germinativo e consideram que a produção de mudas não é problema para a implantação de

plantios. Estes autores, citando Pereira et al. (1982), relatam que as sementes de paricá podem ser armazenadas durante um período de, aproximadamente, dois anos, sem que percam o seu poder germinativo. Porém, há necessidade do desenvolvimento de estudos de melhoramento genético, técnicas de produção mais eficientes e determinar os custos de produção de mudas. Por outro lado, para a implantação do projeto de reflorestamento deve haver a preocupação com a aquisição de mudas de boa qualidade, sementes e substratos livres de agentes patogênicos.

O paricá apresenta elevado índice de sobrevivência no campo, independentemente do sistema de plantio que está sendo adotado. Esta é uma característica positiva para sua manutenção em projetos de reflorestamentos ou sistemas agroflorestais. Em vários trabalhos (MARQUES, 1990; RIBEIRO, 1997; PEREIRA et al., 1982) foi observada uma sobrevivência superior a 95%.

As empresas florestais estão desenvolvendo plantações de paricá em monocultura ou em sistemas consorciados com outras espécies de ciclo curto e/ou longo com a finalidade de testar vários tipos de espaçamentos e níveis de adubação. Os resultados obtidos nos experimentos serviram de base para as empresas definirem técnicas de manejo dos plantios da referida espécie (COSTA et al., 1998).

Cabe salientar que são imprescindíveis estudos para definir o espaçamento das plantações de paricá conforme o uso de sua madeira. Segundo Carvalho (1996), o espaçamento atua diretamente no crescimento das árvores e na qualidade da madeira. Este pesquisador estudando a espécie tatajuba (*Bagassa guianensis* Aubl.) sugeriu plantios com espaçamento maiores de 4m x 4m, para a obtenção de madeira resistente para a construção civil e plantios com espaçamento inferiores de 2m x 3m ou 3m x 3m para a obtenção de lâminas ou móveis finos.

De acordo com dados da CIFlorestas (2013), estima-se que a área de plantios no Brasil tenha sido superior a 87 mil ha. A sua madeira apresenta coloração branca e tem baixa massa específica, em média 0,40 g/cm³. A sua produtividade anual encontra-se na faixa de 20 a 30 m³/ha/ano, estando na mesma faixa de crescimento das espécies de *Pinus* que é de 25 a 30 m³/ha/ano, e superior à teca com 15 a 20 m³/ha/ano (IWAKIRI et al., 2010).

2.2 PROPRIEDADES DA MADEIRA DE PARICÁ E SEUS USOS

Estudos da composição química da madeira de *Schizolobium amazonicum* foram realizados por Vidaurre (2010) e o autor mostrou que a fração de carboidratos da madeira, principalmente com relação ao teor de celulose, é muito similar a de alguns clones de eucalipto utilizados na indústria de celulose e papel. Também foi evidenciada uma baixa quantidade de extrativos, que foi atribuída à utilização de amostras obtidas de indivíduos jovens, com cerne praticamente inexistente. Conforme afirmado por Guler et al. (2007), há a tendência de madeiras de árvores jovens apresentarem valores reduzidos de extrativos, quando comparado aos teores encontrados em madeiras de árvores adultas para uma mesma espécie. Esse aspecto pode ser atribuído à pouca ou não formação do cerne e a grande proporção de madeira juvenil observada em árvores mais jovens.

Quanto à caracterização anatômica (Figura 2), esta espécie apresenta pouco parênquima axial; cerca de 2 poros/mm²; raios homogêneos (3 - 4 seriados); fibras abundantes de paredes moderadamente finas (7 µm), curtas, com comprimento entre 894 e 1.832 µm (ROSA, 2006).

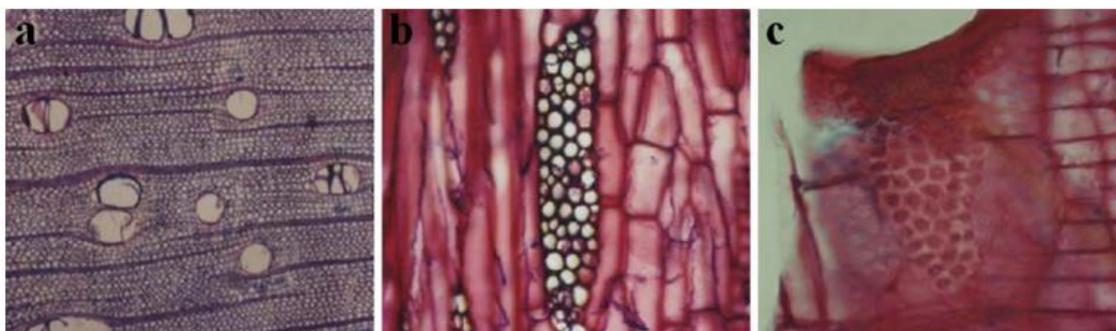


Figura 2. Disposição dos elementos de vaso e raios (a), composição dos raios (b) e arranjo das pontuações (c), da madeira de paricá aos 6 anos de idade. Fonte: Terezo (2010).

A madeira do paricá apresenta processamento fácil e recebe bom acabamento, tem textura média (diâmetro dos poros de 110 a 100 µ) e grã cruzada ondulada, porém possui baixa durabilidade natural, sendo suscetível ao ataque de fungos, cupins e outros insetos xilófagos. É empregada na fabricação de palitos de fósforo, saltos de calçados, brinquedos, maquetes, embalagens leves, canoas, forros, miolo de painéis e portas, formas de concreto, laminados, compensados (MELO et al., 1989). Pereira et al. (1982) consideraram que a madeira do paricá fornece celulose de boa qualidade, pois o fácil branqueamento permite a

fabricação de papel com excelente resistência. Porém, Vidaurre (2010) mostrou ser promissora a produção de pasta celulósica, embora tenha apresentado menor rendimento devido a baixa massa específica, menor branqueabilidade e maior consumo de energia que o apresentado para madeira de *Eucalyptus grandis*.

É considerada promitente para produção de painéis aglomerados (NAUMANN et al., 2008; IWAKIRI et al., 2010), e no estado do Pará, fibras do *Schizolobium amazonicum* já são utilizadas pela empresa Rio Concren® em parte da composição de chapas MDF (*Medium Density Fiberboard*), as quais são produzidas majoritariamente com fibras de espécies do gênero *Eucalyptus* (MELO, 2012).

Por sua arquitetura e floração vistosa, pode ser empregada em arborização de praças e jardins amplos. Como produto não madeireiro, a casca do paricá é utilizada com fins medicinais para o combate de diarreia e hemorragia uterina (CARVALHO, 2007). Rosa (2006) destaca ainda a semente, a qual vem apresentando um aumento considerável por sua procura com o aumento da demanda para implantação de novas áreas.

2.3 COMPÓSITOS E PAINÉIS ESTRUTURAIS DE MADEIRA

O consumo de madeira serrada vem diminuindo gradativamente, enquanto que o consumo de painéis possui uma tendência crescente. Vieira et al. (2012) mostraram que essa redução ocorre devido a alguns fatores:

- A escassez de madeira de grandes diâmetros economicamente viáveis para exploração;
- O acelerado desenvolvimento tecnológico para a produção de painéis à base de madeira mais baratos e competitivos;
- A crescente pressão ambiental exercida por diversos setores da sociedade – em especial, dos países temperados que são essencialmente os consumidores desses produtos – contra a destruição das florestas;
- A crescente aceitação do mercado em substituir os produtos de madeira sólida por painéis à base de madeira que atendam as necessidades específicas dos mesmos.

Nesse mesmo sentido, observa-se uma preferência por parte dos países em desenvolvimento por painéis à base de madeira, principalmente em função do preço. Esse aumento no consumo e na produção de painéis teve início nos países de clima temperado, que desenvolveram essa nova tecnologia de processamento da madeira para atender à demanda de produtos dessa natureza (VIEIRA et al., 2012). Segundo estes autores, a indústria de painéis de madeira é de suma importância para a economia brasileira,

sobretudo pela dinâmica de novas tecnologias associada à geração de renda e emprego nos setores moveleiro e da construção civil, sendo este o de maior crescimento atualmente no País. O crescimento econômico interno aliado ao crescimento mundial do consumo de madeira processada mecanicamente é reflexo do aumento do poder aquisitivo das classes menos privilegiadas e da valorização da moeda nacional frente ao dólar.

Segundo a *American Society for Testing and Materials* - ASTM D 5456 (2001), norma americana para madeiras e produtos de madeira, compósitos estruturais de madeira são produtos engenheirados destinados a uso estrutural, confeccionados com adesivo para exterior (resistente à umidade) e qualificado de acordo com especificações da ASTM D 2559 (2001). Nesta classe de compósitos enquadram-se os painéis do tipo LVL (*Laminated Veneer Lumber*), o qual se refere a um painel composto por lâminas de madeira coladas usualmente no mesmo sentido da grã (SOUZA, 2009). Também fazem parte desta classe o PSL (*Parallel Strand Lumber*) e o LSL (*Laminated Strand Lumber*), todos esses com uma característica em comum: o alinhamento da grã dos componentes de madeira, sendo este prioritariamente paralelo ao comprimento da peça produzida, com o objetivo de otimizar a rigidez e a resistência (Figura 3) (SHMULSKY e JONES, 2011).

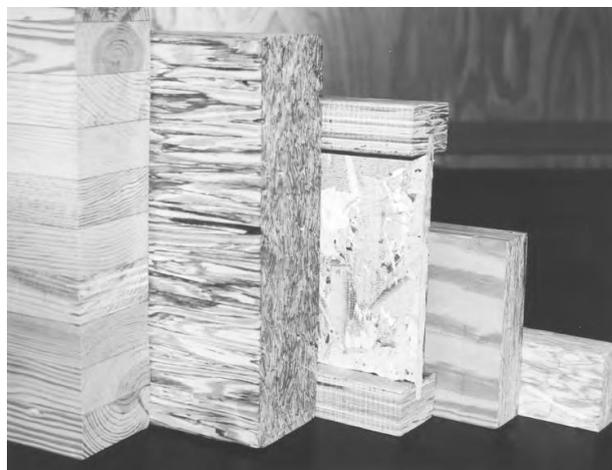


Figura 3. Exemplos de compósitos estruturais de madeira. Da esquerda para a direita: glulam, PSL, viga em “T”, LVL e PSL. Fonte: Shmulsky e Jones, 2011.

Ainda conforme estes autores, quanto aos painéis estruturais de madeira, podem ser citados ainda o compensado e o OSB (*Oriented Strand Board*). Painéis estruturais são produzidos a partir de uma grande variedade de materiais e de tamanhos que podem variar de madeira serrada até fibras. Da mesma forma que os compósitos estruturais, os painéis estruturais são mais homogêneos que a madeira serrada, distribuem uniformemente os

defeitos e podem ser confeccionados em diversos tamanhos.

O mais importante na concepção tecnológica é que estes compósitos e painéis estruturais combinam as propriedades de resistência natural da madeira com as modernas técnicas de engenharia e produção para criar produtos estruturais eficientes utilizando-se fontes de recursos diferentes (resíduos industriais, melhor aproveitamento de matéria-prima etc.) (SOUZA, 2009). Dentro deste contexto, o que se segue são breves considerações sobre a manufatura, aspectos importantes da produção, usos e mercado dos produtos estruturais de madeira que foram objetos deste trabalho, o compensado e o LVL.

2.3.1 O painel de compensado

O compensado é um painel constituído por lâminas de madeira dispostas perpendicularmente umas às outras. Historicamente, há indícios de que a fabricação de compensado iniciou-se no Egito em 1500 A.C., quando desenhos demonstram a colagem de folhas de madeira sendo coladas com algum tipo de adesivo animal. Nos EUA o uso do compensado começou em 1830 por uma indústria de pianos. A partir deste momento, pesquisas se desenvolveram no sentido de mecanizar o processo de fabricação destes painéis (PEDROSA, 2003).

O surgimento das resinas sintéticas (ureia-formaldeído e fenol-formaldeído) na década de 1950 permitiu um maior desenvolvimento dos painéis compensados, garantindo uma colagem bem mais resistente entre as lâminas de madeira (ZUGMAN, 1998). Esse aumento de resistência tornou o produto mais versátil, pela possibilidade de aplicação em situações de alta umidade relativa ou até mesmo em contato direto com água. De acordo com Almeida (2002), a resina a base de ureia, no entanto, apresenta uma menor resistência à umidade, fato que pode ser contornado parcialmente através do uso de fortificantes. Desse modo, o uso final do compensado é muitas vezes determinado de acordo com o tipo de resina empregada. A utilização de colas mais resistentes permitiu que o compensado tivesse também uso externo, sendo empregado como matéria-prima para construção de barcos e formas para concreto (TOMASELLI, 1998).

O uso da resina fenol-formaldeído confere ao compensado alta resistência à ação da umidade e água, em função da sua composição química. Conforme Iwakiri et al. (2007), o processo de prensagem à alta temperatura requer alguns cuidados especiais, como controle do teor de umidade das lâminas do miolo, que deve estar abaixo de 8% para evitar a formação de “bolhas” e delaminações no painel, em função da alta pressão interna de vapor

gerada entre as linhas de colagem das lâminas (MARRA, 1992). Kurt e Cil (2012) citando Kairi (2002) comentam também sobre a importância do efeito da alta temperatura de prensagem sobre a resistência e a qualidade da adesão. Segundo os autores, os três parâmetros mais importantes nesta etapa do processo de fabricação são o calor, a pressão e o teor de umidade.

Dependendo da viscosidade do adesivo, madeiras que possuem poros de diâmetros grandes absorvem mais cola conferindo melhor adesão. No entanto a gramatura deverá ser compensada sempre que houver alteração de espessura, pois lâminas mal torneadas (corrugadas) necessitam maior gramatura (SILVA et al. 1998 citado por LIMA et al. 2011).

Os parâmetros no processo de colagem como o espalhamento correto do adesivo, pressão aplicada e as propriedades da superfície (incluindo limpeza e rugosidade) exercem grande influência no resultado final. Assegurar a qualidade da superfície é de grande importância pois lâminas mais lisas promovem boas linhas de cola resultando em resistência maior do produto final (AYDIN et al., 2013).

As buscas por novas fontes de matérias-primas somadas às vantagens da madeira de paricá demonstram a necessidade de aumentar o volume de pesquisas sobre esta espécie, e também sobre a qualidade dos produtos oriundos. Iwakiri et al. (2006) reforçam a ideia de Tsoumis (1991), relatando que as características tecnológicas da madeira adequada para laminação e produção de painéis compensados estão relacionadas, principalmente, com os seguintes fatores: massa específica da madeira (baixa a média), características do fuste (diâmetro e forma) e grã direita a levemente inclinada.

Quanto às espécies de árvores, as de rápido crescimento apresentam vantagens em termos de maior incremento volumétrico da madeira (GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2012; IWAKIRI et al., 2007; 2012). No entanto, essa característica reflete em algumas limitações técnicas relacionadas à madeira, sobretudo quanto à sua massa específica e porosidade (MARRA, 1992; TSOUMIS, 1991).

As propriedades físicas e mecânicas do compensado são diretamente proporcionais às características da madeira (JANKOWSKY e AGUIAR, 1983; TAMMELA, 1998). Albino et al. (2011) avaliaram as propriedades físicas e mecânicas de compensados produzidos a partir de madeira de *Toona ciliata* com duas pressões e duas gramaturas distintas, além da influência da inclusão de lâminas de *Pinus* sp. na qualidade desses painéis. Além da madeira de *Toona ciliata* apresentar potencial para a produção de painéis compensados, a inclusão de lâminas de *Pinus* sp. exerceu influência positiva sobre a maioria das propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

A madeira de paricá é considerada de baixa a média massa específica, tornando-se uma vantagem técnica significativa na fabricação de painéis compensados para fins estruturais, que requerem maior resistência mecânica. Estudos mais recentes evidenciam que 30% das lâminas produzidas com esta espécie são utilizadas como capa (parte externa do compensado) e o restante como miolo, isto é, a parte interna (ROSA, 2006).

Marra (1992) e Tsoumis (1991) relatam que as madeiras com maior massa específica apresentam menor porosidade, o que irá influenciar diretamente na redução da penetrabilidade do adesivo durante a formação da ligação adesiva. Segundo estes autores, a formulação do adesivo deve ser ajustada para adequação das condições de colagem em função da massa específica da madeira e finalidade de uso dos painéis.

O princípio de fabricação do compensado é a colagem de lâminas de madeira, em número ímpar de camadas, sobrepostas com a direção das fibras das camadas sucessivas formando ângulos retos entre si. O direcionamento ortogonal de uma lâmina em relação a outra adjacente restringe a movimentação tangencial das camadas e resulta em valores de retratibilidade similares, nas duas direções do plano da chapa, conferindo ao compensado excelente estabilidade dimensional. Além disso, o direcionamento cruzado das fibras também proporciona a uniformidade das propriedades mecânicas nas duas direções do plano da chapa (TSOUMIS, 1991).

Com relação ao processo de produção de compensado, Albino et al. (2011) evidenciam como as interações entre as variáveis do mesmo são muito abrangentes. As características inerentes à madeira, o tipo, a quantidade e a composição do adesivo, assim como os procedimentos empregados na colagem de lâminas, são de fundamental importância na qualidade dos painéis (BALDWIN, 1995; SELLERS, 1985).

Segundo Archer (1948), a qualidade do compensado está relacionada também ao tipo de adesivo, ao processo de colagem e aos fatores do “ciclo da prensa” como a temperatura, o tempo de prensagem e a pressão adotada. Normalmente as fábricas aplicam uma pré-prensagem a frio no painel antes de levá-lo à prensa aquecida. Isso permite um carregamento mais fácil e evita que as lâminas saiam do lugar resultando em um painel de baixa qualidade. A prensagem à quente une as lâminas firmemente e aquecem o adesivo até a temperatura necessária para a polimerização da resina (SHMULSKY e JONES, 2011).

Devem-se verificar as consequências das determinadas alterações qualitativas e quantitativas dos adesivos bem como as condições de prensagem que podem influenciar na qualidade do produto final. O excesso de umidade com temperaturas elevadas de prensagem provoca falhas pela formação de bolhas debilitando a colagem (SELLERS,

1985). O tempo de montagem é necessário para que haja compatibilidade da cola com a lâmina de madeira, antes de serem prensadas.

2.3.2 O painel de lâminas paralelas (*Laminated Vanner Lumber - LVL*)

O LVL é um tipo de compósito estrutural de madeira que não é produzido a nível comercial no Brasil, mas em países da América do Norte e Europa já é amplamente empregado. Este é um composto estrutural da madeira projetado para competir com a madeira serrada, particularmente com peças de grandes dimensões (MCKEEVER, 1997).

O LVL pode ser definido como um composto estrutural constituído de lâminas de madeira de pequena espessura, com as fibras da madeira orientadas principalmente ao longo do comprimento da peça, no qual a espessura das lâminas não deve exceder a 6,4 mm (ASTM D 5456, 2001). Este material pode ser produzido a partir de árvores de pequenos diâmetros e convertido em elementos de grandes comprimentos (TAMMELA, 1998). Segundo Smulski et al. (1997), o aproveitamento das toras na produção de painéis LVL é, em média, 12% superior ao aproveitamento médio das toras no desdobro em madeira serrada. O processo de produção de LVL transforma material de baixa qualidade em produtos de alta qualidade, que podem ter seus valores de resistência pré-estabelecidos e são substitutos da madeira serrada em uma variedade de aplicações estruturais, em que os atributos da madeira sólida são de elevado custo (MATOS, 1997).

O painel LVL apresenta duas categorias distintas: os estruturais para uso em aplicações de larga dimensão e longos períodos, e os não estruturais para instalações móveis. A primeira é usada extensivamente na América do Norte, com mais da metade de toda a sua produção sendo usada como flanges em vigas. A Europa também está começando a usar mais produto estrutural. O produto de uso não estrutural é popular na Ásia, particularmente no Japão, e devido a sua excelente estabilidade é usada em várias aplicações, como esquadrias de janelas e portas e componentes para escada (SINKO, 2003).

Com relação ao compensado, as principais diferenças apresentadas pelo LVL dizem respeito à montagem dos painéis (orientação das lâminas), número de lâminas (mais de 20), espessura das lâminas (2,0 a 6,4 mm), forma e dimensões dos painéis (até 70 mm de espessura e comprimentos (até maiores que 20 m) e utilização, prioritariamente estrutural longitudinal, como vigas e caibros, por exemplo (CARVALHO e LAHR, 2003). É esteticamente muito semelhante à madeira sólida e, não obstante sua composição simples, apresenta algumas propriedades desejáveis encontradas em painéis compensados e

aglomerados, como a estabilidade dimensional. Por esses aspectos, seu uso na produção de móveis e materiais de acabamento tende a crescer onde a madeira serrada seja muito cara ou onde outros materiais não atendam a requisitos estéticos ou de resistência mecânica (MÜLLER, 2009).

Como elemento estrutural longitudinal, o LVL se diferencia das vigas de madeira laminada colada (MLC), devido a estas peças serem concebidas com camadas de lâminas mais espessas, como tábuas, obtidas de corte por serras.

O propósito básico dos compósitos estruturais de madeira – como o LVL – é o de reduzir a probabilidade de encontrar defeitos inerentes à madeira (como os nós e rachaduras), ao utilizar lâminas finas na fabricação de compósitos. Com isso, tem-se o aumento médio da resistência mecânica e até da estabilidade dimensional, uma vez que as lâminas ou partículas são secas até um teor de umidade de 12% ou menos (BERGLUND e ROWELL, 2005). De acordo com Souza (2009), dentre os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas nos painéis LVL, destacam-se: os tipos e as propriedades dos adesivos, a espécie de madeira, etapas de produção e o eixo estrutural quando analisadas de forma estática.

Na colagem de lâminas de madeira com propósito estrutural é comum a utilização de resinas fenólicas, mas tecnologias para emprego de isocianatos e poliuretanos também estão disponíveis, embora pouco utilizadas (MALONEY, 1996). De acordo com Frihart (2005), quando se trata de compósitos de madeira, a falha do adesivo estrutural implica em sérios danos à estrutura, inclusive com o risco fatal para humanos. Segundo Freas e Selbo (1952), a característica esperada do adesivo utilizado em peças laminadas coladas é que proporcione resistência de colagem e durabilidade, possibilitando às peças laminadas atuarem como um único elemento estrutural por todo seu tempo de vida útil. Dessa forma, os adesivos utilizados não devem causar danos ou diminuir a resistência da madeira. Adicionalmente, devem permitir as operações de produção sem dificultar ou causar danos aos equipamentos.

Por se tratar de produto estrutural, o LVL deve ser manufaturado com adesivo sintético termofixo a prova d'água. Os adesivos tipicamente usados para atender às exigências de durabilidade dos produtos estruturais são o fenol-formaldeído e o resorcinol-formaldeído, sendo que o último apresenta um custo muito maior do que o primeiro, e a durabilidade de ambos é praticamente a mesma (SELBO, 1975). Resinas com mistura de fenol-formaldeído e resorcinol-formaldeído (em menor proporção) também são comuns na fabricação de LVL, de forma a minimizar o tempo de prensagem.

A temperatura e o tempo de prensagem variam de acordo com a espessura do LVL, tipo de madeira, conteúdo de umidade das lâminas, gramatura de adesivo aplicada e tipo de junta entre as lâminas. Altas temperaturas de prensagem trazem como vantagens melhor escoamento do adesivo e menor tempo para atingir a sua cura, o que repercute em maior produtividade. Em contrapartida, aumentam os riscos de formação de bolhas de vapor (BORTOLETTO JÚNIOR, 2006).

A pressão aplicada influencia a penetração do adesivo, uma vez que ela irá forçá-lo dentro dos poros, dos materiais fibrosos e da rugosidade da superfície (COGNARD, 2005), sendo a qualidade da colagem afetada pela quantidade de adesivo que penetrou na madeira durante a fabricação do painel LVL. Esta quantidade de adesivo deve ser suficiente para que os danos causados à superfície da lâmina de madeira durante o seu processamento sejam reparados, permitir um bom contato superficial interno entre as lâminas e para que a adesão química (*interlocking*) aconteça, e a tensão seja transferida adequadamente entre as lâminas (KURT e CIL, 2012).

Para que um processo de laminação tenha alto rendimento e produza lâminas de qualidade adequada, torna-se fundamental a seleção da matéria-prima. A escolha da madeira normalmente é feita com base no uso final que será dado ao produto. O conhecimento das características e da qualidade do lenho serve para estimar a adequação de uso das lâminas produzidas, bem como permite ajustes nas técnicas de preparação e processamento das toras. Tanto coníferas como folhosas podem ser usadas para a produção de boas lâminas (MÜLLER, 2009). Na América do Norte, contudo, as coníferas são as mais usadas para a produção de painéis laminados para a construção. Características de colagem e resistência às condições de uso adverso podem afetar a escolha das espécies, embora testes tenham mostrado que juntas coladas de longa durabilidade e alta resistência podem ser produzidas com praticamente todas as espécies nativas americanas (SELBO, 1975).

Bal e Bektas (2012) estudaram as propriedades mecânicas de LVLs produzidos a partir de lâminas de faia (*Fagus orientalis* L.), álamo híbrido (*Populus x euramericana*) e eucalipto (*Eucalyptus grandis*), utilizando os adesivos uréia-formaldeído, melamina-uréia-formaldeído e fenol-formaldeído. Os resultados mostraram que as diferenças encontradas nos valores de MOR ocorreram devido às diferenças de massa específica entre as espécies, e não ao tipo de adesivo empregado.

A permeabilidade da madeira é característica de grande influência nas operações de laminação, secagem e colagem. A madeira de boa permeabilidade não impõe maiores dificuldades ao deslocamento da água livre durante a laminação; a permeabilidade facilita a

secagem e, na colagem, além de proporcionar uma fácil penetração, permite uma maior evaporação do vapor d'água que se desprende durante a cura do adesivo (LUTZ, 1978).

No Brasil, tendo em vista as dificuldades cada vez maiores na obtenção de matéria-prima proveniente de florestas nativas, extraída de espécies tradicionalmente usadas, como a *Araucaria angustifolia*, surgiu a necessidade da utilização de espécies alternativas para a produção de lâminas (IWAKIRI et al., 2000).

Os primeiros estudos de avaliação da viabilidade do paricá para produção de lâminas e de painéis laminados foram realizados na década 1970 (KNOWLES, 1996). Tendo em vista a implantação recente de plantios comerciais com esta espécie, usada principalmente para produção de lâminas e compensados, já se percebe que a mesma ocupa uma posição de destaque no setor (MARQUES et al., 2006).

Embora diferentes na concepção e projetados para usos distintos, os materiais laminados estruturais mantêm algumas semelhanças entre si. Assim, tal qual o compensado, o LVL deve ser montado de modo balanceado, para manter a sua estabilidade dimensional e apresentar equilíbrio no desempenho mecânico, quando o teor de umidade variar ou houver a solicitação por forças internas e/ou externas (MÜLLER, 2009). Ainda de acordo com o autor, as camadas de lâminas de madeira devem ser montadas de tal forma que a secção transversal do produto apresente uma linha neutra central, que a divida em duas partes simétricas e balanceadas entre si. Assim, as camadas equidistantes dessa linha neutra devem ter mesma espessura, ser formadas por madeira de uma mesma espécie, ou por espécies diferentes com propriedades similares, e possuir mesmo teor de umidade por ocasião da colagem e da prensagem.

Ainda que para o LVL as lâminas sejam dispostas prioritariamente na mesma direção em relação à orientação das fibras, a partir do ano 2000 surgiu no mercado internacional uma série de outros produtos semelhantes tratados pelo mesmo nome. Nestes, algumas lâminas internas do painel são orientadas a 90° (em relação à direção das fibras) das demais (CARVALHO et al, 2004). Segundo o autor, estudos mais recentes vêm conferindo pequenas inclinações (6 a 8°) às orientações das lâminas, umas em relação às outras, o que vem resultando em melhoria nas propriedades mecânicas.

Em teoria, os processos de produção de LVL mantêm a sequência básica de etapas necessárias para manufatura de painéis compensados, que é resumidamente, a seguinte: laminação de toras, secagem de lâminas, classificação de lâminas, aplicação de adesivo, montagem dos compósitos, prensagem a frio, prensagem a quente, esquadreamento e acabamento (MÜLLER, 2009).

Processos contínuos de produção requerem altos investimentos de capital. Além disso, necessitam volumosos e contínuos suprimentos de matéria-prima por um lado, e mercado consumidor que viabilize elevadas produções, pelo outro. LVLs produzidos descontinuamente, em prensas para compensados, ficam limitados às dimensões de trabalho de tais prensas, normalmente projetadas para o comprimento padrão de 2,44 m (MÜLLER, 2009).

2.4 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico tem sido pesquisado nos Estados Unidos desde a década de 1940, com a finalidade de conferir estabilidade dimensional à madeira. Stamm et al. (1960) patentearam esse processo de tratamento o qual denominaram de *staybwood* (madeira estável). No Brasil, Brito (1997) é citado como uma das primeiras referências sobre a termorretificação. Este autor avaliou a influência da temperatura na redução da massa, modificação na massa específica e composição química da madeira e sobre a capacidade de retração volumétrica de *Eucalyptus saligna*. Desenvolveu-se também um projeto de preservação de algumas espécies nativas da Caatinga e *Eucalyptus sp.* através de retificação térmica, confirmando dados da literatura, como a resistência ao ataque de fungos e a perda da resistência mecânica (ou flexibilidade) das espécies tratadas (BORGES e QUIRINO, 2005).

Atualmente, grande parte dos processos industrializados envolvem temperaturas entre 150 e 260°C por um tempo que varia de poucos minutos a muitas horas. O *ThermoWood*, processo finlandês, usa vapor quente (100-130°C) para secar a madeira e tratá-la termicamente a 185-215°C por 2 a 3 horas, dependendo do seu uso final. O tratamento térmico alemão OHT (*Oil Heat Treatment*) usa o óleo vegetal como meio de aquecimento da madeira, onde ela é mergulhada em óleo quente a 220°C. No tratamento térmico utilizado na Holanda, o *PlatoWood*, a madeira é tratada em duas fases. Primeiro termo-hidro-mecanicamente, ou seja, mergulhada em um sistema aquoso aquecido com vapor entre 150°C e 180°C. Em seguida a madeira é seca em estufa e aquecida novamente em uma estufa especial em sistema não aquoso entre 150°C e 190°C. Tratamentos acima de 300°C deterioram severamente a madeira (HILL, 2006; SANDBERG et al., 2013).

Os estudos acerca do tratamento térmico da madeira se intensificaram durante o século 20 do último milênio, depois que foi observado que a madeira seca em altas temperaturas tem sua cor modificada, menor higroscopicidade e maior estabilidade

dimensional (JOHANSSON, 2005; DEL MENEZZI, 2008; SANDOVAL-TORRES et al., 2010; FANG et al., 2011). Porém, Stamm (1964) citado por Sandberg et al. (2013) mostrou que mesmo ao eliminar o retorno da espessura e obter a estabilidade dimensional da madeira tratada termicamente, outras propriedades importantes como a resistência foram reduzidas.

Quando a madeira é submetida a temperaturas superiores a 105°C, seja por longos períodos ou por curtos (mas a alta temperatura), alguns de seus constituintes podem ser degradados (STAMM, 1964). Segundo Brown et al. (1952), a degradação térmica pode ser dividida em 4 fases: até 100°C liberação de água e óleos voláteis; 100 a 275°C liberação de ácido pirolenhoso e gases; 275 a 350°C reações exotérmicas, formação da maior parte dos destilados e liberação de gases inflamáveis; acima de 350°C formação de carvão (Tabela 1). Porém os constituintes químicos da madeira apresentam boa estabilidade quando submetidos a tratamentos térmicos que não excedam 100°C de temperatura e 48 horas de duração (FENGEL e WEGENER, 1984).

Tabela 1. Alterações na madeira com o aumento da temperatura.

Temp. (°C)	Alterações na madeira
55	A estrutura natural da lignina é alterada. A hemicelulose começa a amolecer
70	Começa a retração transversal da madeira
110	A lignina lentamente começa a perder peso
120	O teor de hemicelulose começa a diminuir e a celulose alfa começa a aumentar; a lignina começa a amolecer
140	A água de impregnação é liberada
160	A lignina se funde e começa a ressolidificar
180	A hemicelulose começa a perder peso depois de ter perdido 4%; a lignina da membrana de pontoações escoa
200	A madeira começa a perder peso rapidamente; as resinas fenólicas começam a se formar e a celulose a se desidratar
210	A lignina solidifica; a celulose amolece e despolimeriza-se; as reações endotérmicas transformam-se em exotérmicas
225	A cristalinidade da celulose diminui e é retomada
280	A lignina atinge 10% de perda de massa; a celulose começa a perder peso
288	Temperatura adotada para a carbonização da madeira
300	O cerne amolece irreversivelmente
320	A hemicelulose é completamente degradada
370	A celulose apresenta perda de 83% de seu peso inicial
400	A madeira é completamente carbonizada

Fonte: SCHAFFER (1973).

2.5 DENSIFICAÇÃO DA MADEIRA

O calor altera as propriedades mecânicas da madeira e provoca uma redução da sua massa. Abaixo de 100°C, esses efeitos são reversíveis. Os efeitos passam a ser irreversíveis ou permanentes com o aumento da temperatura e com a duração do tratamento e estão ligados principalmente à deterioração da madeira, que resulta em perda de massa e resistência (ARRUDA et al., 2011). As perdas dependem de fatores como o teor de umidade, o meio de aquecimento, a temperatura, a duração e, em alguns casos, a espécie e o tamanho da peça envolvida (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Para reduzir esses efeitos de perda de massa, a densificação da madeira começou a ser estudada no final da década de 1930, quando surgiu a necessidade de produtos mais resistentes e duráveis durante a Segunda Guerra mundial. Tanto por impregnação de resinas quanto por compressão mecânica, a densificação foi muito estudada durante esse período, auxiliando a criação de novos produtos de madeira modificada (STAMM e CHIDESTER, 1947; FPL, 2010). O *Staypak*, produzido nos Estados Unidos, ainda é uma tecnologia utilizada atualmente na Suíça. Neste processo, segundo Skyba (2008), amostras úmidas de madeira - com teor de umidade de 15% – são colocadas entre os pratos aquecidos de uma prensa hidráulica e comprimidas a uma pressão de aproximadamente 24 MPa na direção radial. A temperatura alcança 140°C durante o tratamento de 2 horas, e este processo ocorre em sistema aberto, não sendo possível controlar a umidade da madeira. Segundo o autor, este tratamento melhora algumas propriedades físicas e mecânicas, mas o formato final produzido pela densificação é instável e é recuperado totalmente ou parcialmente quando em contato com umidade. Esta tendência em recuperar a espessura original limita a utilização de produtos densificados.

Outro produto norte-americano fruto da densificação é o *Compreg*, que difere do *Staypak* por impregnar a madeira sólida ou lâmina com resina de fenol-formaldeído solúvel em água antes de secá-la a uma temperatura em que não ocorra a pré-cura, e depois prensá-la em uma temperatura que cure a resina. Para a máxima estabilidade dimensional do produto, recomenda-se um teor de sólidos da resina de 30% (HAYGREEN; DANIELS, 1969).

O tratamento hidrotérmico (TH), feito em ambiente úmido, é usado para melhorar as propriedades da madeira, para dissipar tensões internas e para plasticizá-la. É mais comum que a compressão seja feita na presença de umidade, pois facilita o amolecimento da parede celular – sem romper as células - tornando a madeira mais

maleável. Alguns processos comuns são, por exemplo, o tratamento térmico seguido da secagem da madeira, de compósitos ou painéis em alta temperatura. Processos termo-hidro-mecânicos (THM), por outro lado, onde emprega-se pressão, são aplicados para moldagem da madeira, soldagem por fricção e melhoria da qualidade por meio da densificação (SANDBERG et al, 2013).

O processo para a fabricação do VTC wood (*Viscoelastic Thermal Compression*) densifica a madeira usando calor, vapor e compressão mecânica. É realizado de forma a não danificar a microestrutura celular da madeira (KUTNAR e SERNEK, 2007) (Figura 4). A imagem mostra a madeira de tulipeiro (*Yellow poplar*) não tratada e após passar pelo processo VTC, apresentando uma massa específica de 1,20 g/cm³. Os espaços remanescentes são vasos parcialmente colapsados, e nota-se que as paredes celulares não estão fraturadas, apenas acondicionadas em um menor volume.

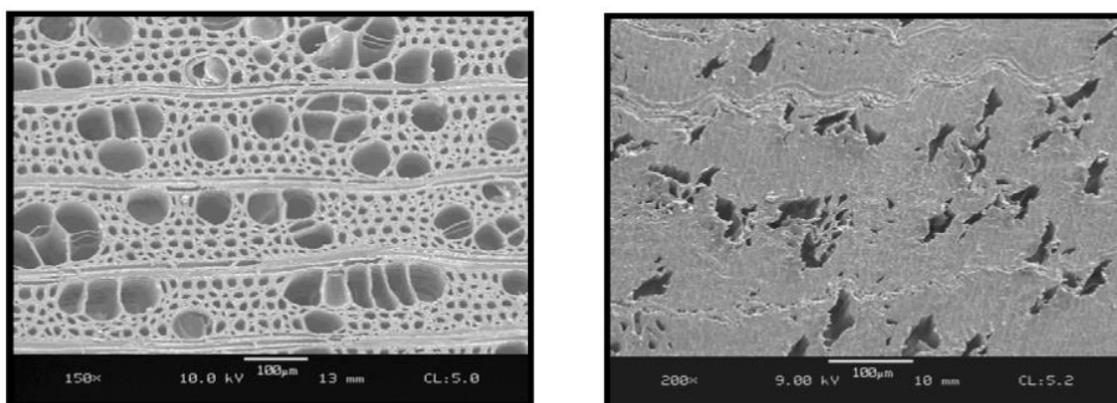


Figura 4. Madeira de tulipeiro (*Yellow poplar*) não tratada (esquerda) e a mesma espécie após o processo VTC (direita). Fonte: Kamke (2006).

O processo VTC pode ser aplicado em lâminas, madeira sólida ou em painéis (KAMKE, 2006), sendo que o produto final terá maior massa específica, resistência e rigidez se comparado com um material não tratado. Além disso, o processo VTC pode ser empregado em qualquer espécie de madeira, porém foi inicialmente desenvolvido para melhorar as propriedades de espécies de baixa massa específica que são plantadas comercialmente.

O indispensável nesses tratamentos, tanto para madeira sólida como para lâminas, é conseguir com que o material tratado seja comprimido com o menor número de fraturas na parede celular para que as propriedades mecânicas não sejam afetadas. Por isso é mais comum a ocorrência de tratamentos termomecânicos que usam a umidade para garantir um

bom amolecimento dos polímeros viscoelásticos da madeira.

Hsu et al. (1989) mostrou que o pré-tratamento utilizando o vapor pode aumentar a compressibilidade da madeira e reduzir a formação de tensões de compressão durante a prensagem à quente. Inoue et al. (1993) conseguiu fixar a forma densificada da madeira aplicando um pós-tratamento de vapor a 200°C por 1 minuto ou 8 minutos a 180°C. Morsing (2000) explicou que a eliminação do *springback* nestes casos onde o vapor é utilizado é resultado da quebra de ligações químicas, que permite o rearranjo da lignina e assim a formação de ligações em novos rearranjos. Reynolds (2004) investigou as propriedades físicas da madeira densificada e concluiu que um inchamento abaixo de 15% só pode ser alcançado se o processo de densificação for feito a 200°C e 100% de umidade.

Assim como o vapor, o calor pode também induzir a fixação permanente da forma densificada do material, por meio da degradação térmica dos componentes higroscópicos da parede celular, especialmente as hemiceluloses (MORSING, 2000). Santos (2000) identificou o tratamento térmico como uma das maneiras mais eficiente de aumentar a estabilidade dimensional da madeira de eucalipto, conhecida pela sua alta higroscopicidade.

Unsal et al. (2011) observaram um maior inchamento em espessura em amostras de *E. camaldulensis* tratadas a 130 e 150°C e diversas pressões em comparação às testemunhas. Os autores atribuíram este efeito ao *springback*, e citam o trabalho de Unsal et al. (2009), que trabalhando com a madeira de pinus, observaram que quanto maior a pressão utilizada no tratamento térmico, maiores eram os valores de absorção de água e inchamento. Além disso, estes autores afirmaram que o fenômeno do *springback* está muito mais relacionado com o nível de pressão do que a temperatura, que está mais relacionada com a deformação permanente do material.

As pesquisas na área de densificação da madeira e de pós tratamentos aplicados posteriormente ao tratamento termo-hidro-mecânico objetivam a possibilidade de tratar madeiras de grandes dimensões, para serem empregadas na construção civil. Contudo, durante a densificação de elementos maiores, ocorrem rachaduras e delaminações - problemas relacionados ao tamanho do elemento. Em amostras menores é possível garantir a homogeneidade e a reprodutibilidade do tratamento, além da uniformidade da temperatura e do teor de umidade das amostras durante a densificação e no processo de pós tratamento (SANDBERG e NAVI, 2007).

2.5.1 Polímeros amorfos da madeira

Os polímeros amorfos têm estrutura molecular desordenada e em estado natural são geralmente transparentes, quebradiços e rígidos. Na madeira, os polímeros amorfos são a hemicelulose e a lignina (MORSING, 2000 citado por ARRUDA, 2012). Em temperatura e umidade ambiente, esses polímeros apresentam um comportamento vítreo e que podem ser caracterizados como duros e frágeis. Porém em alta temperatura e alto teor de umidade, os polímeros ficam mais maleáveis, em um estado caracterizado por grandes deformações plásticas (KUTNAR e SERNEK, 2007; WOLCOTT et al., 1990).

A estrutura não cristalina, heterogênea e de baixo peso molecular da hemicelulose coexiste com a celulose na parede celular, e estas estão intimamente ligadas entre si e com a lignina. A lignina atua como adesivo, unindo as microfibrilas que são formadas por celulose e cobertas por hemiceluloses. Por conta da estrutura amorfa, os grupos hidroxilas da hemicelulose estão muito mais disponíveis para a água do que a celulose (KOCAEFE et al., 2008). Dessa forma, conforme estes autores, removendo as hemiceluloses diminui-se a higroscopicidade. Mas isso também aumenta a parte cristalina da madeira devido ao aumento relativo de celulose. Quando a quantidade relativa da ligação entre hemicelulose-celulose-hemicelulose é substituída pela ligação celulose-celulose a flexibilidade da madeira diminui.

A natureza viscoelástica da madeira tem grande importância na compressão e densificação. Como citado anteriormente, em baixas temperaturas e umidade, a madeira se comporta de forma resistente e até quebradiça (KUTNAR e KAMKE, 2010). Em altas temperaturas e umidade, a madeira apresenta um comportamento flexível e maleável. Entre essas duas condições ocorre a fase de transição, normalmente caracterizada pela temperatura de transição vítrea: a T_g (HORVATH et al., 2011), como mostra a Figura 5. Temperaturas acima da T_g promovem mobilidade e permitem o rearranjo da estrutura molecular amorfa. Consequentemente, grandes deformações podem ocorrer sem fraturas na parede celular. Além disso, temperaturas acima da T_g da lignina – que é a T_g dominante – modificam as propriedades de absorção da madeira (KUTNAR e KAMKE, 2010).

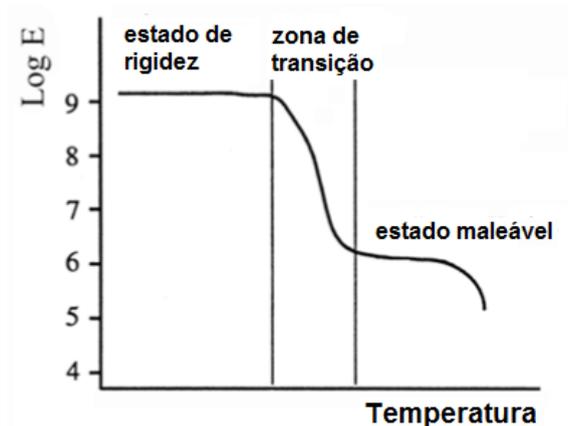


Figura 5. Variação no módulo de elasticidade de um polímero amorfo de acordo com a temperatura. Fonte: Sandberg e Navi (2007).

Os primeiros estudos de transição vítrea em madeira foram desenvolvidos por Goring (1963) e Chow e Pickles (1971), encontrando para madeira seca uma faixa de Tg equivalente a 180 – 200°C. Wolcott et al. (1990) e Back e Salmen (1982) observaram que a umidade abaixa consideravelmente a temperatura de transição vítrea da lignina e da hemicelulose. Segundo esses autores, a transição vítrea da lignina é estabilizada com a temperatura por volta de 115°C. Para a madeira, Irvine (1984) e Kelley et al. (1987) encontraram transições vítreas secundárias em temperaturas de -90°C e -110°C, uma larga faixa de transição vítrea centrada entre 80°C a 100°C e transições secundárias muito fracas a 10°C e 60°C. A Tabela 2 mostra a Tg dos constituintes da madeira segundo diferentes autores.

Tabela 2. Temperatura de transição vítrea dos constituintes da madeira segundo diferentes autores.

Autores	Zona de transição vítrea		
	Celulose	Lignina seca	Hemicelulose seca
Goring (1963)	231-245°C	134-235°C	167-217°C
Back e Salmen (1982)	200-250°C	135-205°C	150-220°C
Hillis (1975)	231-134°C	127-193°C	167-281°C

Fonte: QUIRINO e ZOULALIAN (2000).

A Figura 6 mostra a Tg de polímeros isolados da madeira em função do teor de umidade. É essencial considerar a madeira como um material cujo seus três principais componentes – celulose, hemiceluloses e lignina – estão quimicamente ligados. A um teor de umidade relativamente alto, a figura mostra que a lignina tem a maior Tg, diferentemente da celulose. Portanto, logicamente a lignina é que determina a temperatura

mínima usada em um tratamento termo-mecânico. De acordo com Sandberg e Navi (2007), a escolha da temperatura deve ser baseada em dois critérios: deve ser ao menos 25°C maior que a Tg da lignina, isto é, aproximadamente 110°C sob condição saturada e 140°C à umidade relativa de 80%. Para limitar a degradação térmica dos componentes, a temperatura máxima de 200°C não deve ser excedida.

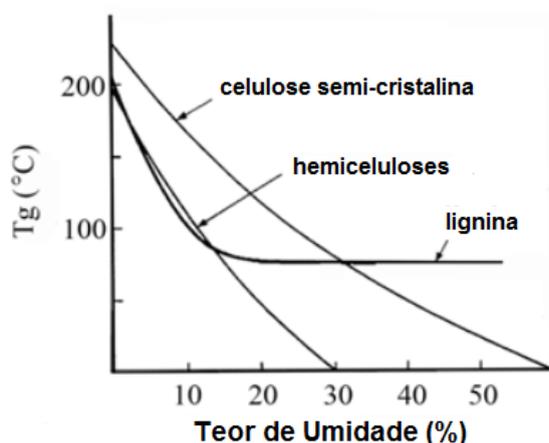


Figura 6. Temperatura de transição vítrea dos componentes isolados da madeira em função do teor de umidade. Fonte: Salmén (1982).

Morsing (2000) citado por Arruda (2012) comenta que a técnica de densificação da madeira requer quatro passos básicos: i) plasticização ou amolecimento da parede celular; ii) compressão da madeira no estado amolecido; iii) definição da deformação por resfriamento e secagem; iv) fixação do estado deformado.

Del Menezzi (2004) explica que quando está à temperatura ambiente, o painel composto comporta-se como um sólido - embora não seja linearmente elástico - e apresenta um determinado nível de rigidez. Essa rigidez impede que as tensões impostas durante a prensagem promovam deformações plásticas em sua estrutura após a consolidação, o que causaria alterações definitivas em suas dimensões. Com o aumento da temperatura do painel - acima de Tg - a matriz formada pelos polímeros da madeira passa a apresentar menor resistência à deformação - torna-se menos rígida - permitindo que as tensões internas sejam liberadas ou minimizadas. No entanto, sob essas condições a liberação das tensões gera deformações elásticas, permitindo um rearranjo da matriz para um estado de menor tensão. Quando o painel retorna à temperatura ambiente, volta a apresentar a sua rigidez característica.

2.6 ESTABILIZAÇÃO DA MADEIRA

Um dos principais problemas em relação à madeira densificada (exceto aquelas com alto teor de resina) é a baixa estabilidade dimensional. Quando colocados em contato com a água, estes produtos tendem a inchar irreversivelmente (*springback*) o que pode ser um problema se a madeira densificada for utilizada em ambientes muito úmidos (SKYBA, 2008). Em relação aos painéis, o tratamento termomecânico comprime as lâminas, que após resfriarem, contêm grande quantidade de tensão de compressão. Dessa forma, quando as lâminas são umedecidas, essa tensão é liberada, e a lâmina tende a retornar à sua espessura original. Esse movimento é conhecido como memória de forma (*shape memory*) (ARRUDA et al., 2011). De acordo com Sandberg e Navi (2007), a origem da memória de forma da madeira vem da densificação que ocorre já no início do tratamento, quando as microfibrilas de celulose sofrem deformação e estocam energia elástica.

Norimoto et al. (1993) detalhou todo o processo, em nível microscópico, e será resumido a seguir: um aumento na temperatura sob condição saturada amolece a matriz (hemiceluloses amorfas e lignina) e as zonas de celulose semi-cristalina. Consequentemente, estes componentes passam de um estado sólido para um estado de maleabilidade. Por outro lado, as microfibrilas de celulose se mantêm no estado sólido devido à sua natureza cristalina e praticamente não são afetadas pela temperatura e umidade. Quando uma pressão é aplicada no sentido perpendicular às fibras da madeira, ela é quase totalmente suportada pelas microfibrilas. O amolecimento da matriz permite um certo deslocamento das microfibrilas, para que estas sejam deformadas elasticamente e assim compensar a carga aplicada. A eliminação das moléculas de água na secagem e a redução da energia de ativação térmica no resfriamento induzem a formação de pontes de hidrogênio entre as moléculas dos componentes da matriz. Além disso, com a redução da temperatura durante o resfriamento, a madeira densificada volta ao estado sólido, onde a deformação elástica das microfibrilas e da matriz fica inativa. Assim, nenhuma recuperação pode ocorrer a menos que a matriz se torne maleável novamente. Entretanto, quando a matriz é aquecida e umidificada, a madeira recupera praticamente toda a sua forma inicial devido a liberação da energia elástica armazenada nas microfibrilas e aos movimentos moleculares entrópicos e elásticos dentro da matriz.

Quando o painel é seco, a madeira contrai retornando em espessura apenas até o ponto referente ao inchamento próprio da madeira. No entanto, a madeira não volta à sua espessura inicial devido à liberação das tensões de compressão. Esse inchamento residual

ou definitivo é representado pela TNRE (Taxa de não-retorno em espessura) (DEL MENEZZI, 2004). Por isso, é importante determinar os parâmetros de prensagem para que o inchamento seja minimizado.

Zdravković et al. (2013) analisaram algumas propriedades de painéis compensados de álamo feitos com lâminas termicamente tratadas (90 minutos a 200°C) e lâminas não tratadas. A variação na umidade de equilíbrio foi examinada, e concluíram que as maiores taxas de não-retorno em espessura foram apresentadas pelos painéis feitos de lâminas tratadas, provando que lâminas termicamente tratadas contribuem na melhoria das propriedades e resistência de painéis à alta umidade.

Zhang et al. (1994) investigaram os principais parâmetros na produção de LVL de poplar (*Populus* sp.) que afetavam a taxa de compressão, e os resultados mostraram que uma alta pressão utilizada e elevada umidade das lâminas levava a uma maior compressão durante a prensagem a quente, agindo com significância sobre o MOR, MOE, massa específica e inchamento em espessura do material.

Alguns trabalhos já foram feitos para estabilizar a madeira densificada por meio de tratamentos com resina (SHAMS et al., 2004), tratamentos químicos (HOMAN; JORISSEN, 2004; GABRIELLI; KAMKE, 2008, 2009), pré e pós-tratamentos com vapor e calor (HEGER et al., 2004; NAVI; HEGER, 2004; INOUE et al., 2008; WELZBACHER et al., 2008), sendo estes últimos os preferidos por não utilizar nenhuma substância química (INOUE et al., 2008; SEBORG et al., 2010).

Haygreen e Daniels (1969) descreveram uma metodologia de densificação simultânea com a secagem da madeira, que produz um material mais estável que aqueles produzidos com outros ciclos de prensagem. O objetivo deste processo é produzir um produto similar - em aparência e resistência - a uma madeira de alta massa específica, a partir de uma espécie de baixa massa específica. Primeiramente a madeira úmida (acima do ponto de saturação das fibras) é colocada entre os pratos aquecidos de uma prensa hidráulica a temperatura de 143°C-182°C, e uma pressão de 172 a 517 kPa é aplicada para promover máxima transferência de calor. Quando o centro da amostra chega a aproximadamente 100°C, a pressão é aumentada para densificar a madeira rapidamente até a espessura desejada. O tempo pode variar de acordo com a espessura inicial e final, geralmente de 75 a 120 minutos quando a amostra tem 2,5 cm de espessura.

Sandberg et al. (2013) citam algumas formas de prevenir a ocorrência de *springback* no material densificado, também esquematizado na Figura 7:

- Impedir a recuperação da sua espessura restringindo mecanicamente os movimentos da madeira;
- Impedir a interação da parede celular com a água, evitando o seu contato com a umidade;
- Formar ligações cruzadas (*crosslinks*) covalentes entre os componentes da madeira densificada por meio da modificação química;
- Aliviar as tensões de compressão armazenadas nas microfibrilas e na matriz durante a compressão, por meio da hidrólise das hemiceluloses sob alta temperatura, ou tratamento termo-hidro-mecânico.

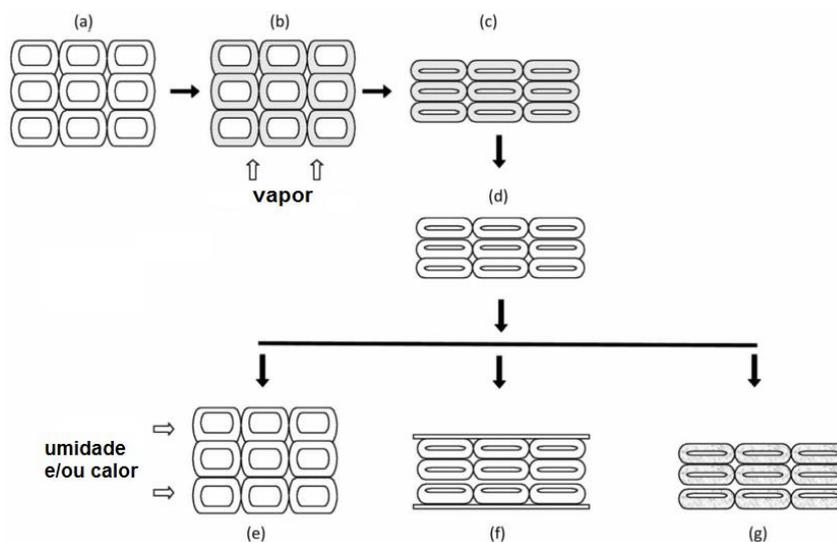


Figura 7. Esquema da densificação da madeira em nível celular, recuperação e diferentes métodos para fixar a compressão: (a) estado inicial, (b) amolecimento da madeira usando vapor, (c) densificação, (d) resfriamento, (e) recuperação total da espessura, (f) restrição mecânica, (g) restrição química ou por tratamento termo-hidro-mecânico. Fonte: Sandberg et al. (2013).

2.7 ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

Durante a compressão a estrutura celular é modificada permanentemente resultando em um novo material com novas propriedades. Um dos principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas e físicas de madeiras modificadas termomecanicamente é a quantidade e o tipo de células que entraram em colapso (KULTIKOVA, 1999).

Segundo Wolcott et al. (1990) citado por Arruda (2012), o colapso pode ocorrer por um encurvamento ou rompimento da parede celular, ou ainda por quebra e esmagamento

celular, dependendo das condições de ensaio e da natureza do material da parede celular. A Figura 8 mostra os tipos de colapso que podem ocorrer na madeira quando esta estiver sob compressão.

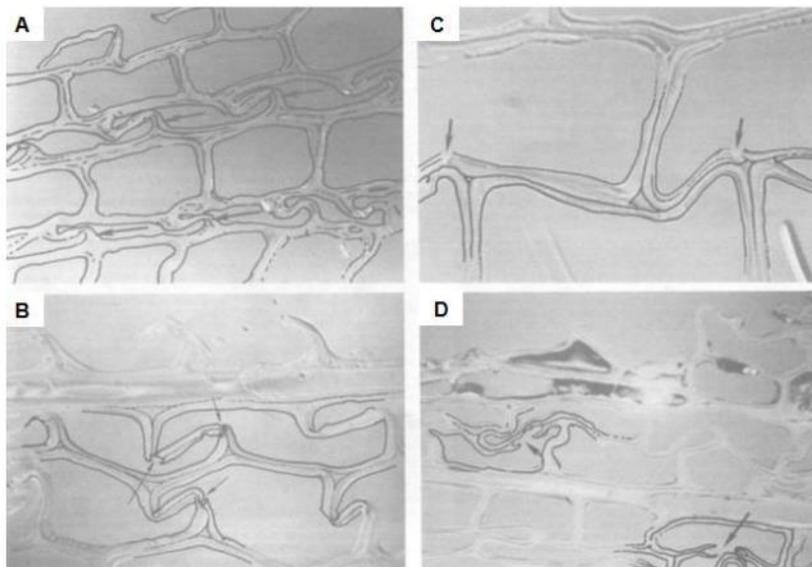


Figura 8. Falhas nas paredes celulares de Douglas-fir (*Pseudotsuga* sp.) por compressão quente. A) Flambagem das paredes. B) Ruptura por extrema flexão. C) Falha na parede primária e secundária por flexão extrema. D) Falha na parede secundária formando buracos. Fonte: Geimer et al. (1985).

Bekhtha et al. (2012) usam a taxa de compressão para expressar em porcentagem a magnitude da mudança na espessura final em relação à espessura original. A taxa de compressão é dependente principalmente da temperatura, pressão e do tempo do processo de compressão da madeira. Segundo os resultados obtidos por estes autores, a taxa de compressão é mais sensível ao aumento de temperatura do que de pressão e de tempo. No entanto, Narayanamurti e Kaul (1966) comentam que geralmente a taxa de compressão aumenta com a pressão e com o teor de umidade das lâminas.

Kutnar e Kamke (2010) estudaram a densificação de álamo em altas temperaturas (150, 160 e 170°C) e sob pressão em condições diversas de vapor. A massa específica final e as propriedades do material densificado foram afetadas pela temperatura e pelo vapor, e não houve fraturas nas paredes celulares. Em amostras densificadas em vapor saturado, o MOR e o MOE aumentaram proporcionalmente ao aumento da massa específica, enquanto que em amostras densificadas em vapor superaquecido o MOR e o MOE aumentaram pouco em relação ao aumento da massa específica.

Rautkari et al. (2010) mencionam que a dureza da superfície da madeira densificada

pode aumentar em mais de 100%. Esta propriedade pode aumentar significativamente quando a madeira é densificada em menos de um milímetro. Citam ainda que a dureza da superfície da madeira densificada tem relação praticamente linear com o grau de densificação.

Haygreen e Daniels (1969) também verificaram um aumento do MOR e MOE proporcionalmente ao aumento da massa específica. Eles compararam amostras tratadas (impregnação de resina fenol-formaldeído antes da densificação) e não tratadas de *Pinus resinosa* e *Pinus taeda*, e praticamente não houve diferenças entre o *P. resinosa* tratado com resina e não tratado com relação às propriedades mecânicas citadas.

Outros autores afirmam que o tratamento TM influencia negativamente nas propriedades mecânicas. Sandberg et al. (2013) observaram que em tratamentos térmicos acima de 150°C, a resistência da madeira é reduzida e ela se torna quebradiça. A massa específica da madeira diminui cerca de 5-15% durante o tratamento, causando a diminuição da resistência, mas ela também é causada pela deterioração da parede celular. Estes autores mostraram que em geral, as reduções nas propriedades mecânicas da madeira são de: 5-10% na dureza, 10-20% na resistência à flexão, 5-20% no módulo de elasticidade e 30-80% na resistência ao impacto.

O principal efeito negativo da densificação é o efeito *springback*, que é a tendência que o material tem de voltar a sua espessura inicial depois da liberação das tensões. É causado pelo armazenamento de energia de deformação elástica durante a compressão de microfibrilas semi-cristalinas de hemiceluloses. Apesar de existir essa energia armazenada, a madeira comprimida mantém a sua forma após a prensagem devido à união das microfibrilas deformadas com a lignina e a celulose por meio de fortes ligações covalentes e pontes de hidrogênio das hemiceluloses (HEGER et al., 2004). Arruda (2012) mostrou que uma peça comprimida colocada na água vai inchar em função da liberação das tensões de compressão e também em função da higroscopia da madeira, compondo o inchamento em espessura total. O inchamento higroscópico, no entanto, é reversível e quando a madeira perde água a espessura do material tende a retornar à espessura inicial. Porém, o inchamento resultante das tensões de compressão é irreversível e modifica permanentemente a forma da madeira (Figura 9). Esse inchamento também é chamado de taxa de não retorno em espessura (TNRE), e representa uma importante medida da estabilidade dimensional.

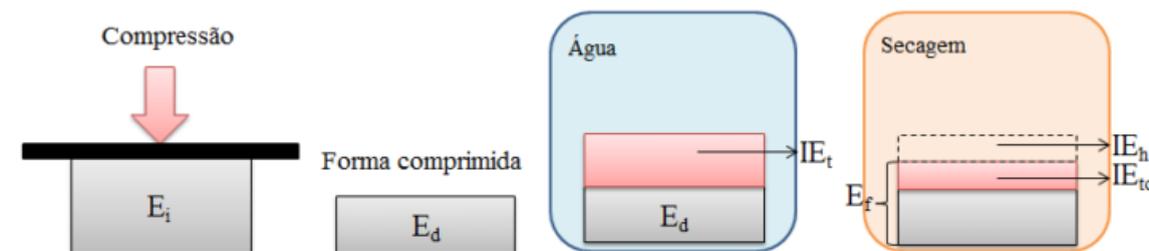


Figura 9. Esquema do inchamento em espessura de madeiras comprimidas, onde E_i , E_d e E_f representam as espessuras inicial, depois da compressão e final, respectivamente e IE_t , IE_h e IE_{tc} representam os inchamentos em espessura total, higroscópico e de tensão de compressão. Fonte: Arruda (2012).

Um material que tenha alta TNRE tem maior inchamento e maior expansão em espessura. Além disso, em materiais colados, a liberação das tensões de compressão ocasiona a perda da qualidade da colagem e nesse sentido a qualidade do adesivo é importante para manter o painel colado e limitar a liberação das tensões (MOHEBBY et al., 2009). Alguns autores fazem um pós-tratamento para que as tensões de compressão formadas durante a prensagem sejam liberadas lentamente e assim fixar a forma final sem prejudicar o material (DEL MENEZZI, 2004; SUCHSLAND e XU, 1991; HSU et al. 1989). Inoue et al. (1993) mostram que a utilização de vapor após a compressão é indispensável para a fixação permanente da forma comprimida. Eles ainda acrescentam que o efeito da vaporização é mais eficiente quando a madeira é comprimida. Nessa condição, os autores afirmam que quase não houve retorno em espessura após a compressão. Provavelmente a fixação da estrutura da madeira comprimida por vaporização é uma consequência do amolecimento da matriz termoplástica na qual as microfibrilas cristalinas de celulose cristalina estão incorporadas. Dentro da matriz amolecida, as microfibrilas se reacomodam (HEGER et al., 2004; INOUE et al., 1993). O estudo de Heger et al. (2004) indica claramente que a temperatura e a pressão de vapor têm efeito predominante sobre a fixação da forma da madeira comprimida. O vapor no pós-tratamento desempenha dois papéis importantes: por um lado contribui para a hidrólise dos componentes da madeira e, por outro lado aumenta a cinética de reação e relaxamento da energia elástica. O relaxamento das tensões de compressão ocorre devido ao rearranjo dos polímeros, causado pelo calor. O pós-tratamento é importante para o aumento da estabilidade dimensional da madeira após a compressão. (KAMKE e SIZEMORE, 2008).

2.8 ALTERAÇÕES NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Por ser um polímero amorfo, a madeira apresenta um comportamento típico ao ser aquecida: ela fica flexível, ou seja, há uma transição de um estado rígido para um estado maleável (YOUNG e LOVELL, 1991) chamado temperatura de transição vítrea (T_g), e cada componente da madeira tem um comportamento específico. Chow (1994) mostra que a lignina possui uma T_g entre 127 e 193°C, que é mais baixa que da hemicelulose (167-181°C) enquanto que a T_g da celulose é a mais alta, 240°C. Muitos autores (MORI et al, 1973; GEIMER et al, 1975; WOLCOTT e SHUTLER JR., 2003) já concluíram que o comportamento maleável da madeira aquecida é influenciado pelo seu teor de umidade e a espécie, devido a variação natural de seus compostos químicos.

O consenso entre os autores é que determinar a T_g dos componentes da madeira é um processo complexo devido a alguns fatores:

- Os componentes extraídos quimicamente podem ser diferentes daqueles presentes originalmente na madeira, devido às mudanças ocorridas durante a separação ou isolamento;
- Algumas técnicas não são capazes de determinar o T_g dos componentes da madeira no seu estado saturado. Em condições anidras (sem água), a transição vítrea dos componentes da madeira ocorre em temperaturas relativamente altas, ocasionando uma rápida taxa de decomposição. Para limitar este processo, é importante utilizar técnicas rápidas de determinação da T_g .

O tratamento térmico influencia fortemente as propriedades da madeira, como sua higroscopicidade, resistência mecânica, massa específica, estabilidade dimensional e durabilidade. Isso ocorre devido a redução dos grupos hidroxilas da celulose e hemiceluloses que estão envolvidos na degradação oxidativa, deterioração por fungos e absorção e desorção de água pela madeira (HILL, 2006).

Muitos trabalhos foram feitos para investigar as modificações químicas que ocorrem nos constituintes da madeira durante o tratamento térmico, porém uma série de reações endotérmicas e exotérmicas ocorre simultaneamente, fazendo com que a observação da temperatura que ativa cada uma das reações seja praticamente impossível. Além disso, a taxa de degradação térmica é diferente para cada um dos constituintes da madeira, sendo maior para as hemiceluloses, menor para a celulose e menor ainda para a lignina (SANDBERG et al., 2013).

Ao aplicar calor, alguns polímeros da madeira se quebram, influenciando

negativamente as propriedades mecânicas, e novos polímeros insolúveis em água são formados. A presença do oxigênio neste processo pode resultar em uma degradação ainda mais severa da celulose, potencialmente reduzindo a resistência da madeira (HOMAN; JORISSEN, 2004)

TJEERDSMA et al. (1998) trataram termicamente pinus e faia em duas etapas, a primeira em ambiente úmido (autoclave) e a segunda em ambiente seco (estufa), tendo como principal resultado a diminuição da higroscopicidade. Os autores explicaram em nível molecular o que aconteceu em cada etapa para justificar as melhorias causadas pelo tratamento térmico: na primeira etapa, ocorreu a formação de ácido acético a partir das hemiceluloses, que catalizou a clivagem dos carboidratos, causando a despolimerização destes. A degradação do ácido catalizado resulta na formação de formaldeído, furfural e outros aldeídos, assim como na clivagem da lignina. O aumento do número de sítios reativos nos anéis aromáticos da lignina ocorreu nesta etapa, mas continua na etapa seguinte. Na segunda etapa do tratamento térmico, a autocondensação da lignina ocorreu por meio da formação de pontes de metileno, que conectam os anéis aromáticos. Algumas reações ocorreram entre os aldeídos formados na primeira etapa do tratamento e os sítios reativos dos anéis aromáticos da lignina, para conectá-los por meio das pontes de metileno. A extensão dessas reações levou ao aumento das ligações cruzadas, com consequente melhora da estabilidade dimensional e redução da higroscopicidade da madeira.

Conforme Sandberg e Navi (2007), em tratamentos termo-hidro-mecânicos, a madeira é densificada a temperaturas e umidades relativas variando de 110 a 140°C e 80 a 100% respectivamente. Sob estas condições, a lignina, hemiceluloses e a celulose semi-cristalina podem ser moldadas facilmente graças a dois fenômenos moleculares:

- As ligações inter e intramoleculares de Van der Waals em um polímero amorfo ou semi-cristalino diminuem drasticamente quando a temperatura é maior que a sua Tg;
- As ligações inter e intramoleculares de hidrogênio em um polímero amorfo que contém grupos hidroxilas (-OH) diminuem drasticamente quando seu teor de umidade aumenta. Isso ocorre porque as moléculas de água absorvidas ficam entre as moléculas, ligadas aos grupos hidroxila, aumentando a distância média entre elas e a sua mobilidade, diminuindo a Tg.

2.9 ALTERAÇÕES EM OUTRAS PROPRIEDADES

O tratamento térmico volatiliza os componentes da madeira que são usados como fonte de nutrientes para os fungos apodrecedores e alteram a estrutura da madeira (RAPP, 2001). Porém, a susceptibilidade ao ataque de cupins ainda é um problema, portanto não é recomendado usar madeira tratada termicamente em contato com o chão (JAMSA e VIITANIEMI 1998; KAMDEM et al., 2002; SKYBA, 2008).

De acordo com a literatura (KAMDEM et al., 2002; WEILAND e GUYONNET, 2003), o aumento da resistência da madeira tratada termicamente à biodeterioração dos fungos pode ser explicado por quatro razões diferentes:

- i) a madeira torna-se hidrofóbica, o que limita a sorção de água e a torna desfavorável ao crescimento de fungos;
- ii) durante o tratamento térmico, ocorre a geração de novos extrativos que podem agir como fungicidas;
- iii) modificação dos polímeros da madeira, tornando-os desconhecidos para as enzimas envolvidas na deterioração por fungos;
- iv) degradação significativa das hemiceluloses, que são uma das principais fontes de alimentos para os fungos.

Hakkou et al. (2006) investigaram as razões para o aumento da resistência biológica de faia tratada termicamente contra o fungo *Coriolus versicolor*, e eles observaram que existe uma correlação importante entre a temperatura do tratamento e a resistência, sendo esta praticamente de 100% quando o tratamento foi a 240°C. Para os autores, este resultado indica que a modificação e degradação química é a razão que mais explica o aumento da resistência biológica em madeiras termicamente tratadas.

Skyba (2008) aplicou um tratamento termomecânico em amostras de spruce e faia antes de colocá-las em contato com o fungo de podridão branca, porém o tratamento não aumentou a resistência das espécies à deterioração do fungo. As amostras onde o tratamento termo-hidro-mecânico foi aplicado apresentaram melhora na estabilidade dimensional e nas propriedades mecânicas, devido às alterações na composição química e na micromorfologia da madeira.

Uma característica marcante das madeiras tratadas termicamente é a mudança de cor que acontece após o aquecimento por certo período (ARRUDA, 2012). Folhosas, de maneira geral, mudam de cor à temperaturas mais amenas que as coníferas, e o escurecimento – evidenciado pela diminuição dos parâmetros colorimétricos L* e b* -

ocorre devido à oxidação e hidrólise de algumas substâncias presentes na superfície da madeira (HAYGREEN e DANIELS, 1969; MATSUO et al., 2010). Conforme White e Dietenberger (2001), o escurecimento da madeira causado pelo calor é propiciado pela degradação térmica das hemiceluloses e da lignina, que se inicia em temperaturas amenas como 65°C, e dependerá do pH, teor de umidade, período de exposição ao calor e a espécie.

Sundqvist et al. (2006) afirmaram que a madeira escurecida pelo tratamento térmico pode ser indicada como alternativa ao uso de madeiras tropicais de coloração escura. Outros autores sugeriram que a cor da madeira serve como um indicador do grau da modificação (GOUVEIA, 2008; TODOROVIC et al., 2012).

Arruda e Del Menezzi (2013) obtiveram como resultado do tratamento térmico aplicado nas madeiras de cedrinho, angelim, tachi preto e mandioqueira a redução drástica dos parâmetros L* e b*, conferindo uma aparência avermelhada e escurecida a todas as espécies.

Fang et al. (2012) citaram a importância da cor para a aparência de pisos de madeira, e densificando a madeira de bordo eles perceberam o seu escurecimento com o aumento da temperatura. A 180°C, o L* diminuiu e a* e b* aumentaram; a 200°C, a madeira tornou-se ainda mais escura e avermelhada, e os autores mencionaram a preferência desta coloração nas madeiras utilizadas para a fabricação de tábuas para pisos.

Entre os vários usos para a madeira densificada – móveis para jardim, sauna, cozinha, banheiro, pisos, portas e janelas – está a fabricação de instrumentos musicais (AKYILDIZ; ATE, 2008; ALTINOK et al., 2010). Pfriem et al. (2005) citaram as vantagens de utilizar a madeira termicamente tratada para fabricar instrumentos musicais, como melhoria das características acústicas, aumento da velocidade de propagação da onda, amortecimento de ruídos e “*radiatio ratio*” (razão entre velocidade da onda e a massa específica). Por outro lado, os autores citam algumas desvantagens, como a redução da resistência mecânica e aparecimento de microfissuras na estrutura anatômica.

Pfriem et al. (2005) enumeram ainda os problemas associados ao mercado de instrumentos musicais, como a demanda crescente de produtos de alta qualidade, a redução de espécies específicas para a fabricação de determinados instrumentos e o uso de espécies tropicais. Por isso, a madeira termicamente tratada poderia ser usada para suprir a demanda de matéria-prima na indústria de instrumentos musicais, além de atuar na restauração de instrumentos antigos.

Mohebbi et al. (2007) investigaram a influência do tratamento hidrotérmico nas

propriedades acústicas da madeira de amoreira, uma espécie tradicionalmente utilizada para a produção de instrumentos musicais no Irã. O tratamento tornou a madeira hidrofóbica e dimensionalmente estável, além de reduzir sua massa específica, devido à despolimerização das hemiceluloses e a remoção de extrativos solúveis formados. Os autores concluíram que estas mudanças melhoraram as propriedades acústicas da madeira.

Estudos mostraram que o tratamento térmico da madeira resulta na perda de grupos hidroxila, que causa a redução na higroscopicidade e um aumento na hidrofobicidade da superfície, conseqüentemente reduzindo a molhabilidade (NGUILA INARI et al, 2006; SERNEK, 2002; GÉRARDIN et al., 2007; KOCAEFE et al., 2008). A madeira torna-se hidrofóbica, o que pode impedir a colagem ou pintura adequada por produtos à base de água.

A molhabilidade e a termodinâmica da superfície da madeira são estudadas pela medição do ângulo de contato entre um líquido e a madeira. As forças intermoleculares que agem na interface madeira-líquido determinam o ângulo de contato e a capilaridade do líquido, que estão relacionados com a química e a micromorfologia da superfície. Uma superfície muito modificada pode afetar a molhabilidade e a adesão nos processos de colagem e acabamento da madeira. As propriedades da superfície do material podem fornecer informações importantes para compreender a molhabilidade da madeira por vários líquidos como colas e tintas. Além disso, essas informações são úteis ao analisar as mudanças na composição química da superfície após os tratamentos térmicos (KUTNAR et al., 2012). Estes autores avaliaram o comportamento da superfície de amostras de pinus em três espessuras diferentes, que foram densificadas até a espessura de 15 mm. Em um terço das amostras, aplicou-se um pós-tratamento a 200°C com a presença de vapor, e em outro terço aplicou-se óleo de linhaça. Os resultados mostraram que, devido a elevação da hidrofobicidade, houve um aumento no ângulo de contato entre os líquidos analisados e a madeira densificada, e também uma diminuição na energia livre total da superfície e nos espaços livres entre as células devido à densificação.

No processo de produção do painel de compensado, a montagem das lâminas de forma perpendicular umas às outras reduz o inchamento, a delaminação e o empenamento. Adicionalmente, o tratamento térmico diminui a afinidade da madeira por água. Como citado anteriormente, uma das formas de se determinar esta afinidade é o ângulo de contato. Vários trabalhos mostraram que em lâminas termicamente tratadas (DIOUF et al., 2011; ARRUDA, 2012), painéis OSB (UNSAI et al., 2010), painéis MDF (JARUSOMBUTI et al., 2010) e em compensados (CANDAN et al. 2012 citado por ZDRAVKOVIC et al. 2013)

o ângulo de contato aumenta com o acréscimo da temperatura e tempo de duração do tratamento, o que indica uma redução da afinidade do material tratado com a água. Melhorias na estabilidade dimensional de LVL feito com lâminas tratadas de álamo foram observadas por Nazerian e Ghalehno (2011).

Arruda e Del Menezzi (2013) aplicaram um tratamento termomecânico a 145°C e a uma pressão de 25% da resistência à compressão perpendicular das espécies analisadas (cedrinho, angelim, tachipreto e mandioqueira), que resultou em um aumento no ângulo de contato entre a superfície da madeira e o líquido, indicando diminuição da molhabilidade. Como o objetivo deste trabalho foi a avaliação das propriedades das espécies citadas após o tratamento termomecânico para o uso em pisos de madeira, a redução na molhabilidade foi importante, uma vez que o produto demanda uma baixa interação com a água.

2.10 CUSTOS

Madeiras e painéis modificados normalmente são mais caros, devido ao custo das substâncias químicas e do processamento diferenciado para a produção. É essencial que estes custos não sejam tão elevados a ponto de prejudicar a competitividade do produto no mercado. Além disso, a madeira modificada geralmente é limitada ao uso em locais específicos, onde o custo elevado justifica-se pelas propriedades especiais necessárias (FPL, 2010).

É importante que as substâncias adicionadas à madeira nos diferentes estágios do seu processamento não impeçam o seu reuso em outros ciclos ou até mesmo que suas cinzas retornem ao meio ambiente sem degradá-lo. Os processos HT e HTM têm a vantagem de adicionar apenas água e energia ao processo, possuem alto rendimento material e são economicamente mais vantajosos quando comparados com o processamento de outros materiais (SANDBERG; HALLER; NAVI, 2013). Porém, as performances técnicas e ambientais das madeiras tratadas hidrotermicamente ou hidro-termomecanicamente não são sempre competitivas com outros produtos equivalentes e devem ser melhoradas.

As áreas com potencial interesse na utilização de madeiras com tratamento HT ou HTM são a construção civil e a indústria moveleira, pois os produtos apresentam um tempo em serviço maior devido ao aumento da durabilidade e estabilidade (SANDBERG et al., 2013).

Considerando a produção em larga escala de painéis, a alta pressão necessária

durante a manufatura torna-se um problema. É importante estabelecer uma técnica para obter madeira altamente densificada utilizando pressões mais baixas (SHAMS et al., 2004). Estes autores obtiveram êxito ao impregnar amostras de cedro japonês com uma resina de fenol-formaldeído antes de densificá-las a 150°C. A resina agiu como um agente plastificante, tornando as paredes celulares altamente maleáveis e reduzindo o módulo de elasticidade. Com isso, o colapso das paredes celulares ocorreu em baixas pressões. Houve um aumento nas propriedades mecânicas analisadas.

O tempo de prensagem também pode ser considerado um fator preocupante nas indústrias de painéis. Este tempo dependerá da transferência de calor, que varia conforme a espessura do material, temperatura e tempo de fechamento da prensa, e distribuição da umidade no painel (TAGHIYARI et al., 2011). Estes autores estudaram a contribuição das nano-partículas de prata na transferência de calor e portanto no tempo de prensagem, além dos efeitos nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis de álamo. Eles misturaram a suspensão de nano-partículas em diversas concentrações na resina utilizada para consolidar o painel, e os resultados mostraram que o tempo de prensagem diminuiu, uma vez que o problema da baixa condutividade térmica da madeira foi contornado, e as nano-partículas de prata ainda melhoraram as propriedades físicas e mecânicas dos painéis.

Para Kamke e Winandy (2009) o mercado para produtos à base de madeira está crescendo cada vez mais, porém a desvantagem destes produtos é a durabilidade. Aumentar esta característica é a chave para uma expansão cada vez maior do mercado. Além disso, é de interesse de todos o desenvolvimento de tecnologias e processos que aumentem a durabilidade dos produtos à base de madeira, como por exemplo, os tratamentos térmicos.

Haygreen e Daniels (1969) sugerem uma metodologia de densificação simultânea à secagem da madeira úmida que tem menor custo que a densificação feita por outros ciclos de prensagem. Os autores estimaram os custos da produção baseados em alguns parâmetros, como a prensa operando 8 horas por dia, durante 250 dias por ano e uma produção anual de 800 m², porém os valores não se aplicam mais aos dias de hoje.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKYILDIZ, M. H.; ATE, S. Effect of Heat Treatment on Equilibrium Moisture Content (EMC) of Some Wood Species in Turkey. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, v. 4, n. 6, p. 660–665, 2008.

ALBINO, V.C.S. et al. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis compensados de *Toona ciliata* M. Roem. var. *australis*. *Cerne*, v. 17, n. 1, p. 103-108, 2011.

ALMEIDA, R. R. Potencial da madeira de clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para a produção de lâminas e manufatura de painéis compensados. 2002. 80 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

ALTINOK, M.; OZALP, M.; KORKUT, S. The effects of heat treatment on some mechanical properties of laminated beech (*Fagus orientalis* l.) wood. *Wood Research*, v. 55, n. 3, p. 131–142, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2559. Standard specification for adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (wet-use) exposure conditions. Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, PA, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard specification for evaluation of structural composite lumber products. ASTM D 5456. Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, PA. 2006.

ARRUDA, L. M. et al. Estudo preliminar das propriedades de compensados produzidos com lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) modificadas termomecânicamente. *Ciência da Madeira*, v. 02, n. 01, p. 29–42, 2011.

ARRUDA, L. M. Modificação termomecânica da madeira de amescla (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.): efeito sobre as propriedades de lâminas e compensados. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, 2012.

ARRUDA, L. M.; DEL MENEZZI, C. H. S. Thermomechanical treatment of tropical wood – Final Report. Associação Nacional dos Produtores de Piso de Madeira, 2013. 23p.

AYDIN, I. et al. The effect of veneers roughness on bonding and some mechanical properties of plywood. *Pro Ligno*, v.9, n.1, p.41-49, 2013.

BACK, E.L.; SALMEN, N.L. Glass transitions of wood components hold implications for molding and pulping processes. *Tappi Journal*, v.65, n.7, p.107-110, 1982.

BAL, B.C.; BEKTAŞ, I. LVL bending properties. *BioResources*, v.7, n.3, p. 3104-3112, 2012.

BALDWIN, R. F. Plywood manufacturing practices. San Francisco: Miller Freeman, 1995.

388 p.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P.; SEDLIACIK, J. Effect of Pre-Pressing of Veneer on the Glueability and Properties of Veneer-Based Products. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 70, n.1-3, p. 99-106. 2012.

BERGLUND, L.; ROWELL, R. M. Wood Composites, Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. CRC Press, 2005. p. 290-291.

BORGES, M.L.; QUIRINO, W.F. Higroscopicidade da Madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. *Revista Biomassa e Energia*, v.1, n.2, p. 71-73, 2005.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Produção de lâminas, compensado e laminated veneer lumber – LVL a partir da madeira de *Pinus merkusii*. 2006, 97 f. Tese (Livre-Docência em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BRITO, J.O. Estudo sobre retificação térmica das madeiras de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Eucalyptus saligna*. Relatório Final. FAPESP-93/4639-0, Piracicaba, 1997. 198 p.

BROWN, H.P.; PANSHIN, A.J.; FORSAITH, C.C. Textbook of wood technology. The physical, mechanical, and chemical properties of the commercial woods of the United States, v.2. New York: McGraw-Hill, 783p, 1952.

BRYNE, L.E. et al. Ageing of modified wood. Part 2: Determination of surface composition of acetylated, furfurylated, and thermally modified wood by XPS and ToF-SIMS. *Holzforschung*, v.64, p.305–313, 2010.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. Anatomia da Madeira. São Paulo: Nobel, 1991. 154p.

CANDAN Z.; BUYUKSARIA U.; KORKUT S.; UNSALA O.; CAKICIER N. Wettability and surface roughness of thermally modified plywood panels. *Industrial Crops and Products*, v.36, p.434-436, 2012.

CARVALHO, M. S. P. de. Influência do espaçamento nas propriedades físico- mecânicas da madeira de *Bagassa guianensis* Aubl. (tatajuba), no planalto de Belterra, PA. Belém, 1996. 176 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Ciências Agrárias do Pará.

CARVALHO, P. E. R. Paricá *Schizolobium amazonicum*. Circular Técnica 142, Colombo, Paraná. EMBRAPA Florestas, 2007. 8p.

CHOW, S.Z.; PICKLES, K.J. Thermal softening and degradation of wood and bark. *Wood and Fiber*, Madison, v. 3, n. 3, p. 166-178. 1971.

CIFLORESTAS. Área plantada do Paricá. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/dado.php?id=74>>. Acesso em julho de 2013.

COGNARD, P. Technical characteristics and testing methods of adhesives and sealants. In:

_____. (Ed.). Handbook Adhesive and Sealants. Oxford: Elsevier, 2005.

COSTA, D. H. M. et al. Alguns aspectos silviculturais sobre o paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber). Belém: Série Rural, n. 2, 1998. 19p.

CURRIER, R. A. Compression of Douglas fir plywood in various hot-pressing cycles. Forest Research Laboratory, *Information Circular*, n. 17, setembro de 1962. 37p.

DEL MENEZZI, C. H. S. Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB). Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, 2004.

DEL MENEZZI, C. H. S. Relationship between Color Modification and Dimensional Stability Improvement of a Thermally Treated OSB. In: INTERNATIONAL CONVENTION OF SOCIETY OF WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY, 51. *Anais...* Concepción, Chile: 2008.

DIOUF, P. N. et al. Effects of thermo-hygro-mechanical densification on the surface characteristics of trembling aspen and hybrid poplar wood veneers. *Appl. Surf. Sci.*, v.257, n.8, p.3558-3564, 2011.

FANG, C.H. et al. Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 70, n. 1-3, p. 155–163, 1 fev. 2011.

FANG, C.H. et al. Densification of wood veneers combined with oil- heat treatment. Part II: hygroscopicity and mechanical properties. *BioResources*, v. 7, n. 1, p. 925–935, 2012.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin: De Gruyter, 1984.

FIGUEROA, M. J. M. Influência da temperatura sobre a resistência mecânica do paricá. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

FPL. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Madison: USDA Forest Service, 2010. p. 508.

FREAS, A. D.; SELBO, M. L. Fabrication and design principles of glued laminated wood structural members. Technical bulletin. USDA: Forest Service: FPL, Washington, n. 1069, 1954. p.1-220.

FRIHART, C.R. Wood adhesion and adhesives. Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, Fl. CRC Press, 2005: pages 215-278.

GABRIELLI, C. P.; KAMKE, F. A. Treatment of chemically modified wood with VTC process to improve dimensional stability. *Forest Products Journal*, v. 58, n. 12, p. 82–86, 2008.

GABRIELLI, C. P.; KAMKE, F. A. Phenol–formaldehyde impregnation of densified wood for improved dimensional stability. *Wood Science and Technology*, v. 44, n. 1, p. 95–104,

21 maio. 2009.

GEIMER, R. L.; MAHONEY, R. J.; LOEHNERTZ, S. P.; MEYER, R. W. Influence of Processing-Induced Damage on Strength of Flakes and Flakeboards. *Forest Products Laboratory*. Madison, WI, 18 p. 1985. (Research Paper FPL-463).

GEIMER, R.L.; MONTREY, H.M.; LEHMAN, W.F. Effects of layer characteristics on the properties of three-layer particleboards. *Forest Product Journal*, v.25, n.3, p. 19-29, 1975.

GÉRARDIN, P. et al. Evolution of wood surface free energy after heat treatment. *Polymer Degradation and Stability*, v. 92, p. 653–657, 2007.

GORING, D.A.I. Thermal softening of lignin, hemicellulose and cellulose. *Pulp and Paper Magazine of Canada*, v.64, n.12, p.517–527, 1963.

GOUVEIA, F. N. Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, 2008.

GUIMARÃES JÚNIOR et al. Seleção de clones de *Eucalyptus urophylla* para produção de compensados. *Cerne*, v. 18, n. 4, p. 667-673, 2012.

GULER, C.; COPU, Y.; AKGUL, M.; BUYUKSARI, U. Some chemical, physical and mechanical properties of juvenile wood from Black pine (*Pinus nigra* Arnold) plantations. *Journal of Applied Sciences*, v.7, p.755-758, 2007.

HAKKOU, M. et al. Investigations of the reasons for fungal durability of heat- treated beech wood. *Polymer Degradation and Stability*, v. 91, p. 393–397, 2006.

HAYGREEN, J. G.; DANIELS, D. H. The simultaneous drying and densification of sapwood. *Wood and Fiber Science*, v. 01, n. 01, p. 16, 1969.

HEGER, F. et al. Mechanical and Durability Performance of THM-Densified Wood. In: Environmental Optimisation of Wood Protection. **Anais...**Lisboa, Portugal: 2004.

HILL, C. A. S. Wood Modification Chemical, Thermal and Other Processes. Belgium: John Wiley & Sons, Ltd, 2006. p. 262.

HILL, C. A. S. et al. The water vapour sorption properties of thermally modified and densified wood. *Materials Science*, n. 47, p. 3191–3197, 2012.

HILLIS, W. E. The role of wood characteristics in high temperature drying. *Journal of the Institute of Wood Science*, v.7, p. 60-67, 1975.

HOMAN, W. J.; JORISSEN, A. J. M. Wood modification developments. *Heron*, v. 49, n. 4, p. 361–386, 2004.

HORVATH, B. et al. Thermal softening of transgenic aspen. *BioResources*, v. 6, n. 2, p. 2125–2134, 2011.

HSU, W.E.; SCHWALD, W.; SHIELDS, J.A. Chemical and physical changes required for

producing dimensionally stable wood-based composite. Part 2: heat post-treatment. *Wood Sci Technol*, v. 23, p.281–288, 1989.

INOUE, M. et al. Steam or heat fixation of compressed wood. *Wood and Fibre Science*, v. 25, p. 224-235, 1993.

INOUE, M. et al. Fixation of compressive deformation in wood by pre-steaming. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 20, n. 4, p. 273–281, 2008.

IRVINE, G. M. The glass transition of lignin and hemicelluloses and their measurements by differential thermal analysis. *Tappi*, v.67, n.5, p.118-121, 1984.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação da qualidade do compensado fenólico de *Eucalyptus grandis*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 16, n. 4, p. 437-443, 2006.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis aglomerados. *Acta Amazonica*, v. 40, n. 2, p. 303–308, 2010.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis compensados estruturais com diferentes composições de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea*. *Árvore*, v.36, n.3, p. 569-576, 2012.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painel compensado estrutural de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. *Floresta*, v. 37, n. 3, 2007.

IWAKIRI, S. et al. Utilização de resíduos de serraria na produção de chapas de madeira aglomerada de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus pilularis*. *Floresta e Ambiente*, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 251-256, 2000.

JÄMSÄ S.; VIITANIEMI P. Heat treatment of wood: Better durability without chemicals. *Nordiske Trebeskyttelsesdager*, p. 47-51, 1998.

JANKOWSKY, I. P.; AGUIAR, O. J. R. Manufatura de painéis compensados com *Eucalyptus*: Caracterização de diversas espécies. *Floresta*, v. 14, n. 1, p. 46-53, 1983.

JARUSOMBUTI, S.; AYRILMIS, N.; BAUCHONGKOL, P.; FUEANGVIVAT, V. Surface characteristics and overlaying properties of MDF panels made from thermally treated rubberwood fibers. *BioResources*, v.5, n.2, p.968-978, 2010.

JOHANSSON, D. Strength and colour response of solid wood to heat treatment. Monografia. Luleå University of Technology, 2005.

KAIRI, M. Glued/screwed joints/screw glued wooden structures. In: JOHANSSON, C. J.; PIZZI, T.; VAN LEEMPUT, M. (Eds.). Wood Adhesion and Glued Products: Glued wood products state of the art - Report. COST Action E13, p. 115-116, 2002.

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

KAMKE, F. A. VTC Wood – the next generation wood product. Corvallis: Oregon State University, 2006.

KAMKE, F.A.; SIZEMORE, H. Viscoelastic thermal compression of wood. United States Patent US 7,404,422. 2008.

KAMKE, F. A.; WINANDY, J. E. Issues and concepts for making durable composites. American Wood Protection Association, 2009.

KELLEY, S. S., RIALS, T. G., GLASSER, W. G. Relaxation behaviour of the amorphous components of wood, *J. of Mat. Sci.*, v.22, p.617-624, 1987.

KNOWLES, O.H. Testes de espécies novas da região foz do rio Amazonas para substituir a *Virola surinamensis* na fabricação de compensados. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE COMPENSADO E MADEIRA TROPICAL, 2, 1994. Belém. Anais... Rio de Janeiro: SENAI/DN, 1996. p.213-229.

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

KULTIKOVA, E. Structure and Properties Relationships of Densified Wood. 1999. 133f. Master Thesis (Master of Science in Wood Science and Forest Products) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, 1999.

KURT, R.; CIL, M. Effects of press pressures on glue line thickness and properties of laminated veneer lumber glued with phenol formaldehyde adhesive. *BioResources*, v.7, n.4, p. 5346-5354, 2012.

KUTNAR, A.; SERNEK, M. Densification of wood. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, v.82, p. 53–62, 2007.

KUTNAR, A. et al. Thermodynamic characteristics of surface densified solid Scots pine wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 70, n. 5, p. 727–734, 21 abr. 2012.

KUTNAR, A.; KAMKE, F. A. Compression of wood under saturated steam, superheated steam, and transient conditions at 150°C, 160°C, and 170°C. *Wood Science and Technology*, v. 46, n. 1-3, p. 73–88, 8 out. 2010.

LIMA, N.N. et al. Influência da gramatura na resistência da linha de cola aos esforços de cisalhamento em painéis compensados de *Copaifera duckei* Dawyer e *Eperua oleifera* Ducke. *Acta Amazonica*, v. 41, n. 1, p. 83 – 90, 2011.

LUTZ, J. F. Wood Veneer: log selection, cutting and drying. Technical bulletin. USDA: Forest Service: FPL, Madison, n. 1577, 1978.

MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. *Forest Products Journal*, Madison, v. 46, n. 2, p. 19-26, 1996.

MARRA, A. A. Technology of wood bonding. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 453p.

MARQUES, L.C.T; YARED, J.A.G.; SIVIERO, M.A. A evolução do conhecimento sobre o paricá para reflorestamento no estado do Pará. Belém: Embrapa, 2006. 5p. (Comunicado Técnico 158).

MATSUO, M. et al. Color changes in wood during heating : kinetic analysis by applying a time-temperature superposition method. *Materials Science & Processing*, v. 99, n. 1, p. 47–52, 2010.

MATOS, J. L. M. Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L. 1997, 117 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MCKEEVER, D. B. Engineered wood products: a response to the changing timber resource. Pacific Rim Wood Market Report, n.123, p.5-15. 1997.

MELO, R.R. Avaliação de variáveis tecnológicas na produção de painéis LVL confeccionados com paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 164p, 2012.

MELO, J. E.; CARVALHO, G. M. e MARTINS, V. A. Espécies madeireiras substitutas do mogno (*Swietenia macrophylla* King.). Brasília: IBAMA, 1989.16 p. (Série Técnica, 6).

MOHEBBY, B.; GORBANI-KOKANDEH, M.; SOLTANI, M. Springback in Acetylated Wood Based Composites. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 9, p. 3103-3106, 2009.

MOHEBBY, B.; YAGHOUBI, K.; ROOHNIA, M. Acoustic Properties of Hydrothermally Modified Mulberry (*Morus alba* L.) Wood. In: European Conference on Wood Modification, 3. Anais... Cardiff, UK, 2007.

MORSING, N. Densification of Wood: The Influence of Hygrothermal Treatment on Compression of Beech Perpendicular to the Grain. Technical University of Denmark, n. 79, p.1-145, 2000.

MÜLLER, M.T. Influência de diferentes combinações de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em painéis estruturais LVL. 2009. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2009.

NARAYANAMURTI, D.; KAUL, R. K. Heat Stabilized Compressed Wood from Indian Hardwoods and Factors Affecting Improvement in Properties. *Holz als Roh-und Werkstoff*, v. 24, n. 11, p. 556-559, 1966.

NAUMANN, R.N.; 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 madeirade *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake e de *Schizolobium amazonicum*

Herb. Revista *Árvore*, v.32, n.6, p.1143-1150, 2008.

NAVI, P.; HEGER, F. Combined Densification and Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood. *MRS Bulletin*, maio, p. 332–336, 2004.

NAZERIAN, M.; GHALEHNO, M. D. Physical and Mechanical Properties of Laminated Veneer Lumber Manufactured by Poplar Veneer. *Journal of Agricultural Science and Technology*, A 1: p.1040-1045, 2011.

NGUILA INARI, G.; PETRISSANS, M.; GERARDIN, P. Chemical reactivity of heat-treated wood. *Wood Science and Technology*, v. 41, n. 2, p. 157–168, 7 jul. 2006.

NORIMOTO, M.; OTA, C.; AKITSU, H.; YAMADA, T. Permanent fixation of bending deformation in wood by heat treatment. In: *Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute*, v.79, Kyoto University, p. 23-33, 1993.

PEDROSA, A. L. Performance de vigas “I” constituídas por flanges de LVL e almas de compensado de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden, e alma de OSB de *Pinus* spp. Curitiba, 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

PEREIRA, A. P., MELO, C. F. M. de, ALVES, S. M. O paricá (*Schizolobium amazonicum*) características gerais da espécie e suas possibilidades de aproveitamento na indústria de celulose e papel. *Revista do Instituto Florestal*, São Paulo, v. 16 A, n 2. p. 1340- 1344, 1982.

PFRIEM, A. et al. Use of wood performed by heat-treatment for musical instruments. Technische Universitat Dresden, Gottingen, 2005.

QUIRINO, W.; ZOULALIAN, A. Transição viscoelástica do *Eucalyptus* comparada com a de uma folhosa e de uma conífera européias. 2000.

RAPP, A. O. Review on heat treatments of wood. *The Federal Research Centre for Forestry and Forest Products*, Hamburg, 2001.

RAUTKARI, L.; KUTNAR, A.; HUGHES, M.; KAMKE, F A. Wood surface densification using different methods. In: *WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING*, Riva Del Garda, Italia, 2010.

REYNOLDS, M.S. Hydro-Thermal Stabilization of Wood-Based Materials. Dissertação (Mestrado), Virginia Tech, Blacksburg, Virginia. 155 pp., 2004.

RIBEIRO, G.D. Avaliação preliminar de sistemas agroflorestais no Projeto Água Verde, ALBRÁS, Barcarena, PA. Belém. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Ciências Agrárias do Pará. 100 f, 1997.

ROSA, L.S. Características botânicas, anatômicas e tecnológicas do paricá (*Schizolobium amazonicum* Huberr ex Ducke. *Revista Ciências Agrárias*, n. 46, p.63-79, 2006.

ROWELL, R.M.; BANKS, W.B. Water repellency and dimensional stability of wood.

Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1985. 24 p. (General Technical Report FPL-50).

SALMÉN, L. The cell wall as a composite structure: Temperature and water induced softening behaviour of wood fiber based materials. Tese (Doutorado). Department of Paper Technology, The Royal Institute of Technology. Stockholm, 1982.

SANDBERG, D.; HALLER, P.; NAVI, P. Thermo-hydro and thermo-hydro- mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science and Engineering*, v. 8, n. 1, p. 64–88, mar. 2013.

SANDBERG, D.; NAVI, P. Introduction to Thermo-hydro-mechanical (THM) wood processing. Report n. 30, School of Technol and Design, Sweden, 2007.

SANDOVAL-TORRES, S. et al. Causes of color changes in wood during drying. *Forestry Studies in China*, v. 12, n. 4, p. 167–175, 2010.

SANTOS, J.A. Mechanical behaviour of Eucalyptus wood modified by heat. *Wood Science and Technology*, v.34, p.39–43, 2000.

SCHAFFER, E. L. Effect of Pyrolytic Temperatures on the Longitudinal Strenght of Dry Douglas Fir. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 1, n. 4, p.319-329, 1973.

SEBORG, M.; TARKOW, H.; STAMM, A. J. Effect of Heat Upon the Dimensional Stabilization of Wood. *Journal of the Forest Products Research Society*, p. 9, 2010.

SEKINO, N. et al. The bond quality of steam pre-treated particles. In: European Panel Products Symposium, 2, Llandudno, 1998, Proceedings, BCC: Llandudno 1998. p. 30-38.

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

SELBO, M.L. Adhesive bonding of wood. Tech. Bull. 1512. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 129 p. 1975.

SERNEK, M. Comparative Analysis of Inactivated Wood Surfaces. Tese (Doutorado). Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, 2002.

SHAMS, M. I.; YANO, H.; ENDOU, K. Compressive deformation of wood impregnated with low molecular weight phenol formaldehyde (PF) resin I: effects of pressing pressure and pressure holding. *Journal of Wood Science*, v. 50, n. 4, p. 337–342, ago. 2004.

SHMULSKY, R.; JONES, P. D. Forest products and wood science, an introduction. 6 ed. West Sussex: Wiley Blackwell, 2011.

SILVA, D. A. da; TOMASELLI, I.; IWAKIRI, S. Influência da umidade na resistência da linha de cola e estabilidade dimensional do compensado utilizando resina de alta reatividade. *Scientia Forestalis*, v. 54, p. 67-77, 1998.

SINKO, H. Aumenta presença de painéis LVL no mercado. 2003. Disponível em: <<http://www.remade.com.br/artigos>> Acesso em novembro 2013.

SIVIERO, M.A. Paricá: uma nova solução. 2009. 28p. Disponível em <www.revistareferencia.com.br/arquivo/cpp.pps>. Acesso em abril de 2015.

SKYBA, O. Durability and Physical Properties of Thermo-Hygro-Mechanically (THM)-densified Wood. Tese (Doutorado). Ucrânia, 2008. 167p.

SOUZA, F. Propriedades mecânicas, físicas, biológicas e avaliação não- destrutiva de painéis de lâminas paralelas confeccionados com madeira de *Pinus oocarpa* e *P. kesiya*. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 135f, 2009.

STAMM, A. J. Wood and cellulose science. New York: Ronald Press, 1964. 549p.

STAMM, A. J.; BURR, H. K.; KLINE, A. A. Heat-Stabilized Wood (Staybwood). Madison, WI: Forest Products Laboratory, n.1621, 1960.

STAMM, A. J.; CHIDESTER. Yearbook of Agriculture 1943-1947. U.S. Department of Agriculture, 1947.

SUCHSLAND, O.; XU, H. Model analysis of flakeboard variables. *Forest Product Journal*, v.41, n.11/12, p.55-61, 1991.

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, p. 549–561, 2006.

TAGHIYARI, H. R.; RANGAVAR, H.; BIBALAN, O. F. Effect of nano-silver on reduction of hot-pressing time and improvement in physical and mechanical properties of particleboard. *BioResources*, v. 6, n. 4, p. 4067–4075, 2011.

TAKESHITA, S. Redução na higroscopicidade e na movimentação dimensional da madeira de folhosas submetida a tratamentos térmicos. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2011.

TAMMELA, K. 1998. Laminated veneer lumber (LVL) manufacturing. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1, Belo Horizonte. Anais. Viçosa, SIF/UFV/DEF: p. 162-168.

TEREZO, R. Avaliação tecnológica do paricá e seu uso em estruturas de madeira laminada colada. 2010. 177f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TJEERDSMA, B. F. et al. Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 56, n. 3, p. 149–153, maio. 1998.

TODOROVIC, N. et al. Estimation of heat-treated beechwood properties by color change. *BioResources*, v. 7, n. 1, p. 799–815, 2012.

TOMASELLI, I. A indústria de painéis no Brasil e no mundo: tendências de mudanças do perfil de produção e usos. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1, 1998, Belo Horizonte-MG. Anais...Viçosa-MG: SIF/UFV/DEF, 1998. p. 55-64.

TSOUMIS, G. Science and technology of wood - structure, properties, utilization. New York. Chapman & Hall, 1991. 494p.

UNSAI, O., et al. Decay and termite resistance, water absorption and swelling of thermally compressed wood panels. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 63, n.5, p.548-552, 2009.

UNSAI, O. et al. Effects of thermal modification on surface characteristics of OSB panels. *Wood Research*, v. 55, n. 4, p. 51–58, 2010.

UNSAI, O. et al. Effect of Thermal Compression Treatment on the Surface Hardness, Vertical Density Profile and Thickness Swelling of Eucalyptus Wood Boards by Hot-pressing. *Mokchae Konghak*, v. 39, n. 2, p. 148–155, 2011.

VIDAURRE, G. B. Caracterização anatômica, química e físico- mecânica da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum*) para produção de energia e polpa celulósica. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, 2010.

VIEIRA, M.C. et al. Evolução Econômica do Pannel Compensado no Brasil e no Mundo. *Floresta e Ambiente*, v. 19, n.3, p.277-285, 2012.

WEILAND, J. J.; GUYONNET, R. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 61, p. 216–220, 2003.

WELZBACHER, C. R. et al. Thermo-mechanical densification combined with thermal modification of Norway spruce (*Picea abies* Karst) in industrial scale – Dimensional stability and durability aspects. *Holz als Roh- und Werkstoff*, v. 66, n. 1, p. 39–49, 9 set. 2008.

WHITE, R. H.; DIETENBERGER, M. A. Wood products: thermal degradation and fire. In: BUSCHOW, K. H. J. et al. (Eds.). *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Oxford: Elsevier, 2001.

WOLCOTT, M. P.; KAMKE, F. A.; DILLARD, D. A. Fundamentals of Flakeboard Manufacture: Viscoelastic Behavior of the Wood Component. *Wood and Fiber Science*, v.22, n. 4, p. 345-361, 1990.

WOLCOTT, M. P.; SHUTLER JR., E.L. Temperature and moisture influence on compression-recovery behavior of wood. *Wood and Fiber Science*, v.35, n.4, p.540-551, 2003.

YOUNG, R.J.; LOVELL, P.A. Introduction to polymers. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. 653p.

ZDRAVKOVIĆ, V.; LOVRIC, A.; STANKOVIĆ, B. Dimensional Stability of Plywood Panels Made from Thermally Modified Poplar Veneers in the Conditions of Variable Air Humidity. *Drvna Industrija*, v.64, n.3, p.175-181, 2013.

ZHANG, H.J.; CHUI, Y.H.; SCHNEIDER, M.H. Compression control and its significance in the manufacture and effects on properties of poplar LVL. *Wood Science and Technology*, v.28, p.285-290, 1994.

ZUGMAN, I.C. Estrutura das indústrias e comércio de madeira compensada e laminada no Brasil e no mundo. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1, Belo Horizonte, 1998. Anais. Viçosa: SIF / UFV / DEF, 1998. p. 49-54.

EFEITO DA DENSIFICAÇÃO PÓS-PRODUÇÃO SOBRE AS PROPRIEDADES DE COMPENSADOS DE PARICÁ (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke)

1. INTRODUÇÃO

O paricá apresenta vantagens para a produção de painéis compensados por apresentar rápido crescimento e com isso tem um maior incremento volumétrico da madeira. No entanto, essa característica reflete em algumas limitações técnicas relacionadas à madeira, sobretudo quanto à sua massa específica e porosidade (MARRA, 1992; TSOUMIS, 1991). O seu crescimento rápido está aliado à formação de madeira de média a baixa massa específica, resultando na produção de painéis de baixa massa específica. Hsu (1997) afirma que boas características da madeira para produção de painéis compensados envolvem baixa massa específica, baixo teor de umidade e extrativos, transição gradual de anéis de crescimento e baixa conicidade da tora, características inerentes à madeira de paricá. Porém, compensados de baixa massa específica apresentam valores menores nas propriedades mecânicas quando comparados com compensados de maior massa específica. No entanto, tais limitações podem ser minimizadas com o emprego de tecnologias adequadas (IWAKIRI et al., 2010).

No sentido de viabilizar o uso deste material para fins estruturais, o tratamento termomecânico é uma alternativa viável por densificar os painéis utilizando calor e compressão mecânica aplicada perpendicular às fibras, que conduzidos em diversas combinações de tempo, temperatura e pressão aumentam a massa específica da madeira ou do compósito e assim melhoram algumas de suas propriedades. Skyba (2008) afirmou que as propriedades mecânicas melhoram proporcionalmente de acordo com a intensidade do calor e pressão aplicados.

As desvantagens do material densificado são o custo geralmente alto e a limitação da sua disponibilidade. Além disso, é um produto dimensionalmente instável. A recuperação da espessura após entrar em contato com a umidade é um problema que muitos autores têm tentado resolver ou pelo menos amenizar (FANG et al., 2012; INOUE et al., 2008; ITO et al., 1998; SALIM et al., 2013; YAN et al., 2010). Sabe-se que os materiais densificados tendem a liberar a tensão de compressão acumulada, e isto ocorre ao absorverem a umidade. O inchamento total em espessura é a soma do inchamento natural

da madeira – por ser um material higroscópico – e o inchamento causado pela liberação da tensão de compressão (ARRUDA; DEL MENEZZI, 2013).

O objetivo deste capítulo foi avaliar o efeito de diferentes estratégias de densificação sobre as propriedades físicas e mecânicas de compensados de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram utilizados painéis compensados de paricá de 12 e 20 mm de espessura. Os painéis de 12 mm de espessura, colados com resina ureia-formaldeído, foram obtidos na fábrica de compensados e portas “PORTIL - Portas Itinga Limitada®”. A indústria encontra-se no distrito de Bela Vista, município de Dom Eliseu, leste do estado do Pará. Os plantios que abastecem a indústria estão localizados no mesmo município. Os painéis compensados de 20 mm de espessura foram adquiridos no comércio em Brasília (DF), e também são colados com resina uréia-formaldeído.

O tratamento termomecânico foi aplicado nos compensados já prontos, dispostos no mercado, e, portanto, a densificação ocorreu posteriormente à sua manufatura.

2.1 TRATAMENTO TERMOMECÂNICO

Para determinar a temperatura, pressão e tempo dos tratamentos que foram aplicados nos compensados de 12 mm, foi realizado um pré-teste (COSTA e DEL MENEZZI, 2014), e após análise dos resultados obtidos chegou-se a oito diferentes combinações de temperatura, tempo e pressão (Tabela 1).

Tabela 1. Tratamentos termomecânicos aplicados nos compensados de 12 mm.

Tratamento n°	Temperatura	Pressão	Tempo sob pressão (min)	Tempo sob pressão zerada (min)
1	120°C	2,94 MPa	7	15
2				30
3			12	15
4				30
5	150°C	2,94 MPa	7	15
6				30
7			12	15
8				30

Os tratamentos foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira na Fazenda Água Limpa, e utilizadas as temperaturas de 120 e 150°C, que são próximas às temperaturas utilizadas por diversos autores (DOGU et al., 2010; KUTNAR; KAMKE, 2010; ARRUDA, 2012; ARRUDA; DEL MENEZZI, 2013). A densificação ocorreu com pressão de 2,94 MPa, que representa 50% da resistência à compressão perpendicular ($f_{c,90^\circ}$) da madeira de paricá (IBAMA, 2013), variando-se o tempo sob pressão entre 7 e 12 minutos.

Após o fechamento da prensa, anotou-se todas as vezes que ela corrigia a pressão automaticamente para mantê-la constante, além de ter-se observado a temperatura interna do painel, que era acompanhada por um termopar colocado na linha de cola central. Essas correções na pressão ocorreram devido à temperatura de transição vítrea ter sido atingida, tornando a madeira maleável e fazendo com que a pressão necessária para mantê-la comprimida fosse reduzida. Quando a temperatura do tratamento foi alcançada na linha de cola central, esperou-se o tempo relativo ao tratamento (7 ou 12 minutos) antes de zerar a pressão e manter o material por mais alguns minutos (15 ou 30 minutos), apenas em contato com os pratos aquecidos. Este é um estágio crucial onde ocorre o relaxamento das tensões de compressão, o que vai refletir na estabilidade dimensional do material, caracterizando assim o pós-tratamento. Foram feitos quatro painéis para cada tratamento, com as dimensões de 26 x 27 cm. Posteriormente à retirada dos painéis da prensa, esperou-se o resfriamento para então levá-los à climatização e assim proceder com as medições.

2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas avaliadas nos compensados foram: flexão estática com obtenção do módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_M), dureza Janka (f_H) - estas de acordo com a norma ASTM D 1037 (1999) com adaptações - e resistência ao cisalhamento na linha de cola ($f_{gv,0}$) de acordo com a norma europeia EN 314-1 (2004).

Realizou-se os ensaios de flexão estática com 10 amostras de cada um dos tratamentos, e também das testemunhas, com dimensões de 450 mm de comprimento e 260 mm de largura. O vão utilizado foi de 210 mm, e esse ensaio caracterizou principalmente a rigidez e a resistência dos compensados e serviu para avaliar se a densificação resultou em ganhos significativos nessas propriedades. Obteve-se o módulo de ruptura conforme a Equação 1 e o de elasticidade conforme a Equação 2. A partir destas amostras foram retiradas aquelas destinadas à realização da dureza Janka. Esses ensaios foram realizados

no Laboratório de Tecnologia da Madeira no Departamento de Engenharia Florestal na UnB, em uma máquina de ensaios universal EMIC com capacidade de carga máxima de 300 kN.

$$f_M = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h^2} \quad \text{Equação 1}$$

$$E_M = \frac{P' \times L^3}{4 \times b \times h^3 \times \Delta} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

f_M = Módulo de ruptura em MPa;
 P = Máxima carga em N;
 L = Vão apoios em mm;
 b = Largura do corpo-de-prova em mm;
 h = Espessura do corpo-de-prova em mm;
 E_M = Módulo de elasticidade em MPa;
 P' = Carga no limite proporcional em N;
 Δ = Deformação da peça em mm.

Para a realização do ensaio de dureza Janka, os corpos-de-prova de 45 mm x 50 mm foram colados três a três para satisfazer a exigência mínima de espessura da norma citada. Para cada tratamento foram feitas 10 repetições.

A resistência ao cisalhamento paralelo à linha de cola ($f_{gv,0}$, em MPa) foi determinado a partir da Equação 3 e foi realizado para avaliar a influência do tratamento termomecânico na qualidade da colagem do compensado na mesma máquina de ensaio universal EMIC, usando-se 10 corpos-de-prova por tratamento, nas dimensões de 25 mm de largura por 90 mm de comprimento.

$$f_{gv,0} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$f_{gv,0}$ = cisalhamento paralelo à linha de cola em MPa;
 $P_{m\acute{a}x}$ = Carga de ruptura em N;
 A = Área em mm².

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

Os ensaios de absorção de água, inchamento em espessura foram realizados conforme a norma ASTM D 1037 (1999), com adaptações no tamanho da amostra. Adicionalmente, estimou-se o teor de umidade em equilíbrio (TUE) para analisar o comportamento higroscópico dos compensados e observar a contribuição do tratamento de densificação para a estabilização dimensional do material.

Os ensaios foram realizados em 10 amostras para cada tratamento, medindo 45 mm x 45 mm, que foram dispostas submersas em água à temperatura ambiente por período de 24 horas, onde nos períodos de 2 e 24 horas a massa e as dimensões foram mensuradas utilizando uma balança de precisão e um relógio comparador, respectivamente. Os valores referentes à absorção de água e inchamento em espessura foram avaliados em porcentagem da diferença entre a medição prévia e medição posterior à imersão em períodos de 2 e 24 horas conforme as Equações 4 e 5, respectivamente:

$$ABS = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

$$IE = \frac{E_f - E_i}{E_i} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

ABS = Absorção de água em %;

M_i = Massa Inicial, anterior à imersão em água em g;

M_f = Massa Final, posterior à imersão em água em g;

IE = Inchamento em espessura em %;

E_i = Espessura inicial, anterior à imersão em água em mm;

E_f = Espessura Final, posterior à imersão em água em mm;

Avaliou-se ainda a perda de massa (PM), medidas nas 10 amostras tratadas de 45 mm x 45 mm de cada tratamento. A PM é a relação entre a massa antes do tratamento termomecânico e a massa após o tratamento (Equação 6). Refere-se à perda de massa total da amostra que inclui a perda de água e de extrativos e a degradação dos polímeros da madeira, devido ao aumento da temperatura e a duração do tratamento. Se a PM for menor que o TUE inicial, significa que não houve perda efetiva de massa, ou seja, a PM foi relativa apenas à perda de água. Adicionalmente, foi determinada a taxa de compressão (TC), que representa o grau de densificação do material, relacionando a espessura final com

a espessura inicial da amostra (Equação 7). Quanto maior é a TC maior é o grau de densificação do material. A PM e a TC foram medidas após a climatização das amostras a 12% de umidade e manutenção da massa constante.

$$PM = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

$$TC = \frac{E_i - E_f}{E_i} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

PM = Perda de massa em %;

TC = Taxa de compressão em %;

M_i e M_f = massa inicial e massa final em g;

E_i e E_f = espessura inicial e espessura final em mm.

Após o ensaio de inchamento e absorção, os corpos-de-prova foram secos em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ até alcançarem massa constante e então foi medida a TNRE - taxa de não retorno em espessura (Equação 8), que representa o inchamento causado pela liberação das tensões de compressão durante a prensagem. O TUE foi obtido nos mesmos corpos-de-prova, após a medição da TNRE, de acordo com a norma ASTM D 4442 (2007).

$$TNRE = \frac{E_f - E_i}{E_i} \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

TNRE = Taxa de não retorno em espessura em %;

E_i = Espessura Inicial, posterior a 24 horas de imersão em água em mm;

E_f = Espessura Final, posterior climatização dos CP à 12% de umidade em mm.

Os valores de todas as propriedades analisadas foram utilizados para o cálculo da eficiência do tratamento (E_f) em melhorar determinada propriedade, conforme sugerido por Rowell & Youngs (1981) e Del Menezzi (2004). Como E_f é a relação entre o valor da propriedade da testemunha e o valor do painel tratado, valores positivos indicam efeito benéfico do tratamento, enquanto valores negativos indicam efeito deletério (Equação 9).

$$E_f \% = \frac{P_{NT} - P_T}{P_{NT}} \times 100$$

Equação 9

Onde:

E_f = Eficiência do tratamento em %;

P_{NT} = propriedade não tratada;

P_T = propriedade tratada.

2.4 ANÁLISE DOS DADOS

A análise estatística dos resultados foi realizada com o programa SPSS versão 18.0 para sistema operacional Windows, de acordo com o número de repetições e de tratamentos específicos para cada propriedade mecânica e física. Foi feita a análise de variância e quando constatada a variação significativa pelo teste F, o teste post-hoc de Dunnett a 5% de significância foi utilizado para comparar as médias das amostras tratadas com a média das amostras testemunha, par a par.

Foi realizada ainda uma Análise de Variância Fatorial com três fatores (temperatura, tempo sob pressão e tempo sem pressão) e dois níveis cada (120°C e 150°C; 7 e 12 minutos; 15 e 30 minutos). Essa análise foi usada para identificar o efeito isolado de cada um dos fatores e a interação entre eles.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PAINÉIS COMPENSADOS DE 12 MM DE ESPESSURA

3.1.1 Massa Específica e Taxa de Compressão

A massa específica aparente (ME), inicialmente de 0,42 g/cm³, variou significativamente após cada tratamento, ficando em média 0,60 g/cm³. O aumento da massa específica foi decorrente da redução da espessura dos painéis (Tabela 2). Em geral, a densificação de um painel de lâminas depende do tipo e da qualidade da madeira que o constitui, dos percentuais de distintos lenhos (juvenil-adulto, inicial-tardio, cerne-alburno) presentes nas lâminas, do teor de umidade e dos parâmetros de prensagem (pressão, temperatura e tempo) utilizados em sua manufatura. Depende fundamentalmente da resistência à compressão perpendicular às fibras que o material apresenta; no caso de lâminas torneadas, uma compressão na direção radial da madeira. As faixas de pressão, temperatura e tempo geralmente utilizadas nas indústrias produzem, dependendo da madeira, retrações de espessura

de 5% a 10%, aproximadamente, para teores de umidade de até 10%. Por essa razão, normalmente, a massa específica de um painel multilaminado é maior que a da madeira sólida (KOLLMANN et al., 1975).

Tabela 2. Valores médios de massa específica (ME) e taxa de compressão (TC) das testemunhas e das amostras de compensado de 12 mm tratadas termomecanicamente.

Tratamento	ME (g/cm ³)	TC (%)
Testemunha	0,42 (2,49)	-
T1 (120°C, 7', 15')	0,61 (1,42)	31,78 (2,29)
T2 (120°C, 7', 30')	0,58 (3,04)	30,18 (1,40)
T3 (120°C, 12', 15')	0,62 (2,71)	37,27 (1,40)
T4 (120°C, 12', 30')	0,63 (3,00)	36,83 (2,69)
T5 (150°C, 7', 15')	0,55 (0,98)	25,98 (6,49)
T6 (150°C, 7', 30')	0,56 (4,87)	29,58 (3,15)
T7 (150°C, 12', 15')	0,61 (2,34)	35,52 (0,97)
T8 (150°C, 12', 30')	0,60 (4,28)	35,69 (1,94)
Média dos tratamentos	0,60	32,85

Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%).

Como a densificação acontece pela redução do volume da madeira causada pela redução da sua espessura, a taxa de compressão (TC) é uma outra forma de quantificar a densificação do material. A TC variou significativamente, em média 32,85% para os tratamentos. Apesar da expectativa em observar o aumento da TC com o aumento da temperatura de 120 para 150°C, não foi o que ocorreu. O maior valor observado, de 36,83%, ocorreu no tratamento 4, enquanto que o menor valor observado, de 25,98%, ocorreu no tratamento 5.

Bekhtha et al. (2012) afirmaram que existe uma relação clara entre a taxa de compressão e os parâmetros do tratamento (como temperatura, pressão e tempo). Segundo os resultados obtidos pelos autores, a taxa de compressão é mais sensível ao aumento de temperatura do que à pressão e ao tempo.

Currier (1960; 1963) estudando a compressibilidade de compensados feitos a partir de

coníferas, concluiu que lâminas com alto teor de umidade comprimem mais durante a prensagem à quente porém se recuperam mais desta deformação, se comparadas às lâminas com baixo teor de umidade.

Inoue et al. (1993) citam a relação entre a massa específica básica e a taxa de compressão. No estudo desenvolvido pelos autores, a massa específica aumentou de 0,36 g/cm³ para 0,50 g/cm³ com um grau de compressão de 30%. Com uma taxa de compressão de 60% a massa específica aumentou para 0,9 g/cm³, mais que dobrando a massa específica inicial.

3.1.2 Temperatura x Tempo

As Tabelas 1 e 2 do Apêndice 4 mostram o tempo e a temperatura quando a prensa fez o ajuste para manter a pressão constante sobre os compensados. O primeiro ajuste normalmente é atribuído ao acomodamento do painel na prensa. O segundo ajuste ocorreu menos de 30 segundos depois nos tratamentos 1 a 4 (120°C) entre 72,3°C e 88,1°C, e menos de 20 segundos depois nos tratamentos 5 a 8 (150°C) entre 58,2°C e 69°C, indicando que esta possivelmente é a faixa da temperatura de transição vítrea para o teor de umidade da madeira no momento do tratamento. Arruda e Del Menezzi (2013) também se utilizam desta observação para detectar a faixa da temperatura de transição vítrea das espécies trabalhadas.

Estes ajustes ocorreram devido a natureza viscoelástica da madeira. Em baixas temperaturas, a madeira se comporta de forma resistente e até quebradiça (KUTNAR e KAMKE, 2010). Em altas temperaturas, a madeira apresenta um comportamento flexível e maleável. Entre essas duas condições ocorre a fase de transição, normalmente caracterizada pela temperatura de transição vítrea: a Tg (HORVATH et al., 2011). Temperaturas acima da Tg promovem mobilidade e permitem o rearranjo da estrutura molecular amorfa. Consequentemente, grandes deformações podem ocorrer sem fraturas na parede celular.

A Figura 1 mostra como de fato evoluiu a temperatura no interior dos compensados durante o tratamento térmico. Observa-se claramente a diferença de temperatura que ocorre entre os tratamentos a 120° (1 a 4) e os tratamentos a 150°C (5 a 8). Por outro lado, observa-se que as curvas de aquecimento seguem a mesma tendência e são compostas por três fases, distinguíveis pela sua inclinação. Del Menezzi (2004) observou o mesmo comportamento nas curvas de aquecimento ao tratar termicamente painéis OSB.

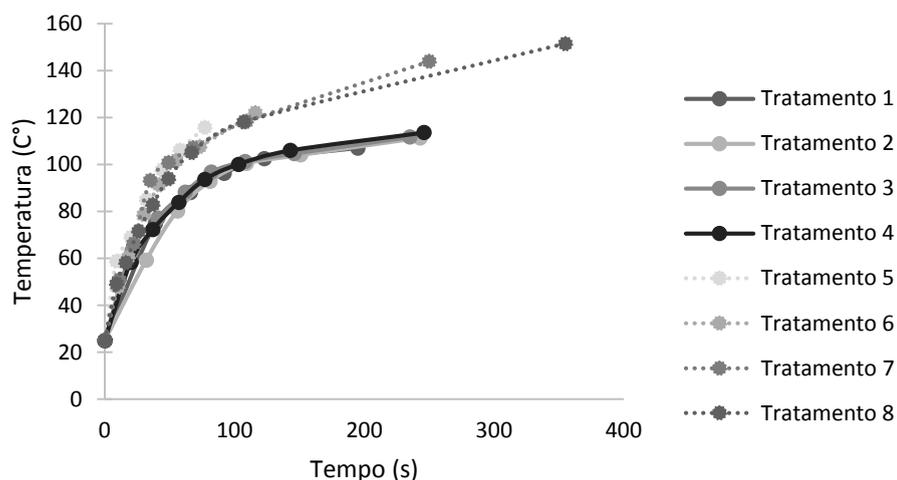


Figura 10. Evolução da temperatura interna durante os tratamentos termomecânicos nos compensados de 12 mm. Tratamentos 1 (120°C, 7', 15'); 2 (120°C, 7', 30'); 3 (120°C, 12', 15'); 4 (120°C, 12', 30'); 5 (150°C, 7', 15'); 6 (150°C, 7', 30'); 7 (150°C, 12', 15'); 8 (150°C, 12', 30').

A primeira fase vai do início do tratamento até aproximadamente 100°C e observa-se evolução muito rápida da temperatura interna do painel. Percebe-se uma evolução mais rápida nos tratamentos a 150°C. À temperatura de 120°C foram necessários em média 70 segundos para alcançar 100°C no interior do painel, enquanto que a 150°C foram somente 53 segundos. Esta rápida evolução da temperatura foi explicada por Del Menezzi (2004), onde ele cita a relação com o conteúdo de umidade do painel, uma vez que as moléculas de água contribuem na transferência de calor. Também pode ser explicado pela compressão mecânica do tratamento, que reduz os espaços vazios, aumenta a massa específica e conseqüentemente aumenta a condutividade térmica desses painéis. Kollmann (1955) e Kurowska et al. (2010) já constataram a dependência praticamente linear da condutividade térmica e a massa específica da madeira.

Quando o painel atinge de 100 a 110°C, ocorre uma grande redução na evolução da sua temperatura interna, o que pode ser observado pela redução na inclinação da reta. Inicia-se a segunda fase, onde a temperatura do painel passa a aumentar muito lentamente, mantendo-se quase constante. Esta fase vai até aproximadamente 250 segundos a 120°C, e 300 segundos a 150°C, e é quando o painel perde água na forma de vapor.

Após a saída da água do painel, a sua temperatura interna volta a se elevar, embora mais lentamente que na 1ª fase. A partir deste ponto inicia-se a terceira fase, cuja duração vai até o painel atingir temperatura próxima do tratamento. Nesta fase, a inclinação da reta é ainda mais reduzida.

3.1.3 Propriedades Físicas

A análise estatística (Apêndice 2, Tabela 5), detectou a existência de diferenças significativas entre as propriedades físicas avaliadas. Observando as propriedades de inchamento de 2 e 24h, absorção de 2 e 24h e TNRE, nota-se que os compensados tratados se tornaram mais instáveis dimensionalmente em comparação com as testemunhas, indicando que os tratamentos termomecânicos aplicados alteraram as relações entre a água e madeira (Tabela 3). Uma das complicações geradas pelo tratamento térmico é a dificuldade na análise no comportamento térmico de seus componentes e suas subsequentes propriedades, devido às grandes alterações em sua estrutura química e anatômica. Sabe-se que reduzindo a capacidade da madeira em absorver água ocorre a melhoria na estabilidade dimensional, porém não foi o que ocorreu nos materiais testados.

Tabela 3. Propriedades físicas dos compensados de 12 mm.

Tratamento	Propriedades (%)						
	IE2h	IE24h	ABS2h	ABS24h	TUE	PM	TNRE
Testemunha	3,53 (14,0)	6,90 (12,0)	25,34 (9,0)	55,65 (5,0)	13,37 (2,0)	-	5,53 (4,0)
T1 (120°C, 7', 15')	30,82* (8,0)	36,73* (6,0)	50,08* (9,0)	74,82* (4,0)	12,87 (1,0)	4,41 (3,0)	4,58* (13,0)
T2 (120°C, 7', 30')	29,25* (11,0)	34,64* (7,0)	52,10* (17,0)	76,73* (9,0)	12,90 (1,0)	4,64 (1,0)	4,28* (10,0)
T3 (120°C, 12', 15')	33,59* (9,0)	41,14* (5,0)	52,20* (12,0)	82,41* (7,0)	12,75 (1,0)	4,77 (5,0)	4,96 (10,0)
T4 (120°C, 12', 30')	35,35* (8,0)	41,26* (7,0)	51,69* (7,0)	77,22* (8,0)	12,92 (2,0)	4,90 (4,0)	4,95 (11,0)
T5 (150°C, 7', 15')	15,85* (41,0)	23,23* (15,0)	34,87* (10,0)	62,43 (8,0)	12,81 (32,0)	6,52 (4,0)	8,60* (11,0)
T6 (150°C, 7', 30')	20,21* (15,0)	27,35* (13,0)	40,75* (12,0)	68,29* (8,0)	12,34 (2,0)	6,96 (10,0)	10,27* (8,0)
T7 (150°C, 12', 15')	28,50* (11,0)	37,17* (9,0)	42,10* (9,0)	68,39* (6,0)	12,59 (76,0)	6,96 (3,0)	8,81* (12,0)
T8 (150°C, 12', 30')	26,66* (20,0)	36,25* (18,0)	38,68* (19,0)	69,69* (13,0)	12,35 (2,0)	7,26 (5,0)	10,29* (10,0)

(*) na mesma coluna indicam valores estatisticamente diferentes da testemunha pelo teste Dunnett a 5% de significância. Este teste não foi realizado para os valores da propriedade perda de massa (PM) pois eles não foram coletados nas testemunhas. Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%). IE2h: Inchamento após 2h; IE24h: Inchamento após 24h; ABS2h: absorção de água após 2h; ABS24h: absorção de água após 24h; TUE: teor de umidade em equilíbrio; PM: perda de massa; TNRE: taxa de não retorno em espessura.

Isso significa que os tratamentos térmicos propostos não liberaram as tensões internas de compressão geradas durante a prensagem do painel, mesmo assim foi possível observar que nos tratamentos a 150°C as amostras tenderam a absorver e inchar menos que nos tratamentos a 120°C. Os resultados de inchamento se aproximam com os obtidos por Arruda et al. (2011), que trataram termicamente compensados de paricá a 150°C por 5, 10 e 15 minutos.

Outra maneira de avaliar a estabilidade dimensional é analisando a espessura do material que foi densificado e que não retornou à forma comprimida após o teste de inchamento. Desta maneira, o valor da taxa de compressão (TC) deve ser maior que o inchamento para assegurar que a forma adquirida pela densificação não seja perdida após o ensaio de inchamento. Como a TC média dos tratamentos ficou em torno de 32% (Tabela 2), nota-se a proximidade deste valor com os de inchamento em espessura após 2h, e os valores de inchamento após 24h chegaram a ser maiores que a TC, concluindo-se então o efeito negativo dos tratamentos sobre a estabilidade dimensional dos compensados.

Resultados semelhantes foram obtidos por Arruda (2012) tratando termicamente lâminas de amescla a 140°C e 180°C previamente à fabricação de painéis compensados e Arruda et al. (2011), onde tratando lâminas de paricá a 150°C, os autores não observaram nenhuma tendência na redução do inchamento com o aumento do tempo de tratamento. Del Menezzi (2004) também observou alguns resultados negativos em relação ao inchamento e a TNRE tratando painéis OSB termicamente. Um aumento na temperatura ou no tempo do tratamento poderia causar uma maior redução na absorção de água. Para uma melhora na estabilidade dimensional dos painéis seria necessária uma redução significativa tanto do inchamento em espessura quanto da absorção de água.

Quando o material densificado é exposto à umidade, o inchamento reversível e irreversível pode ocorrer. O inchamento reversível ocorre devido à natureza higroscópica da madeira, e o inchamento irreversível ocorre devido ao efeito *springback*. O modo mais eficiente de reduzir este efeito é minimizar o acúmulo da tensão de compressão dentro da amostra.

Em relação ao TUE, os tratamentos não diferiram estatisticamente da testemunha. Conforme Del Menezzi (2004), esta propriedade relaciona o montante de moléculas de água adsorvidas nos sítios dos grupos hidroxila da parede celular, e deste modo, o que se conclui é que os tratamentos térmicos não reduziram estes sítios a ponto de reduzir o TUE.

O tratamento térmico altera a estrutura dos polímeros da madeira, tornando-os menos higroscópicos ou mesmo transformando-os quimicamente. Segundo Skaar (1988) a elevação da temperatura da madeira produz como efeito imediato a redução da umidade de equilíbrio para uma considerada umidade relativa e uma permanente redução na higroscopicidade da madeira após retornar para temperatura normal. Entretanto, este efeito depende da temperatura e do tempo de exposição.

A perda de massa (PM) foi em média de 4,68% nos tratamentos a 120°C e de 6,93% nos tratamentos a 150°C. Como a PM não foi aferida nas testemunhas, não realizou-se o teste Dunnett, que as compara com as amostras tratadas. No entanto, segundo a análise de variância, elas variaram significativamente entre si. Quando o valor de PM é superior ao valor de TU antes do tratamento, significa que a quantidade de calor aplicada foi suficiente para evaporar a água e degradar mais algum componente da madeira. Esta análise é feita para averiguar a eficiência de um tratamento em reduzir o TUE do material. É possível observar, no entanto, que em nenhum dos tratamentos a PM foi superior ao TUE antes dos tratamentos, indicando que não houve calor suficiente para eliminar a água contida nas amostras. Esta análise foi realizada por Arruda et al. (2011) após tratar termicamente lâminas de paricá a 150°C por 5, 10 e 15 minutos, e apenas no tratamento mais longo a PM foi superior ao TUE antes dos tratamentos, indicando que houve perda de água e degradação de compostos da madeira.

Um material que tenha alta TNRE tem maior inchamento e maior expansão em espessura. Pode-se observar na Tabela 5 que os valores da TNRE dos compensados tratados são significativamente maiores que a testemunha, exceto nos tratamentos 3 e 4, onde as TNRE foram estatisticamente iguais a esta. As testemunhas tiveram uma TNRE média de 5,53%. Em materiais colados, a liberação das tensões de compressão ocasiona a perda da qualidade da colagem e nesse sentido a qualidade do adesivo é importante para manter o painel colado e limitar a liberação das tensões (MOHEBBY et al., 2009).

Todavia, observa-se que os valores de TNRE são relativamente baixos em comparação à taxa de compressão, que foi em média acima de 30% (Tabela 2). Isto significa que, embora a liberação das tensões de compressão tenha importância ao analisar o inchamento, ela não é a única variável a ser levada em consideração. O fato do adesivo utilizado na confecção dos compensados ter sido uréia-formaldeído também pode ter contribuído no inchamento, uma vez que a umidade excessiva quebra as ligações químicas formadas entre o adesivo e a madeira, afetando negativamente a qualidade da colagem. O

calor excessivo também irá resultar na quebra das ligações químicas do adesivo UF já curado, sendo por isso que nas indústrias o painel construído com adesivo UF é resfriado logo que sai da prensa (STARK et al., 2010).

Valores mais elevados de TNRE também implicam em redução da massa específica do painel, pois a sua espessura, após o ensaio de inchamento e posterior secagem, é aumentada. Isso ocorre porque a massa dos painéis não é afetada no ensaio de inchamento, mas o volume ocupado por ela aumenta, reduzindo assim sua massa específica. A Tabela 1 (Apêndice 5) apresenta os dados da massa específica após o tratamento e após o ensaio de inchamento e secagem em estufa dos compensados. É possível observar que os painéis tratados a 120°C (tratamentos 1 a 4) sofreram uma redução maior de massa específica, quando comparados com os valores iniciais, que os tratados a 150°C (tratamentos 5 a 8). Em uma perspectiva prática, isso acarreta em uma possível redução das propriedades de resistência, comprometendo o comportamento estrutural do painel. Além disso, como dito anteriormente, a qualidade da colagem foi severamente afetada tanto pela umidade como o calor, e a liberação das tensões desenvolvidas também contribuíram para o inchamento em espessura dos compensados tratados.

Os resultados da Tabela 4 mostram a eficiência do tratamento em melhorar determinada propriedade, conforme Rowell & Youngs (1981) e Del Menezzi (2004). Todos os valores de E_f foram negativos – exceto para o TUE - indicando que os tratamentos não foram eficientes na melhoria da estabilidade dimensional dos painéis tratados, e a melhoria trazida ao TUE foi considerada pequena.

Tabela 4. Eficiência (%) do tratamento sobre as propriedades de estabilidade dimensional dos compensados de 12mm.

Tratamentos	Propriedades					
	IE2h	IE24h	ABS2h	ABS24h	TUE	TNRE
T1 (120°C, 7', 15')	-773,11	-432,32	-96,70	-52,65	1,25	-54,21
T2 (120°C, 7', 30')	-726,94	-102,84	-401,35	-55,78	1,02	-44,11
T3 (120°C, 12', 15')	-851,54	-496,22	-104,30	-67,75	2,18	-67,00
T4 (120°C, 12', 30')	-899,75	-496,83	-102,35	-56,91	0,88	-66,67
T5 (150°C, 7', 15')	-300,03	-235,45	-36,72	-27,17	1,70	-189,56
T6 (150°C, 7', 30')	-471,43	-295,52	-59,99	-39,31	5,32	-245,79
T7 (150°C, 12', 15')	-705,81	-437,58	-65,11	-39,28	3,35	-196,63
T8 (150°C, 12', 30')	-649,57	-421,64	-50,39	-41,24	5,22	-246,46

Os três fatores (temperatura, tempo sob pressão e tempo sem pressão) e dois níveis cada (120°C e 150°C; 7 e 12 minutos; quinze e trinta minutos) foram analisados isoladamente para identificar o efeito de cada um sobre as propriedades físicas (Tabela 5). Pode-se observar que, com o aumento da temperatura, há uma tendência de redução de 28% do inchamento após 2h e de 18,3% do inchamento após 24h. O mesmo ocorre com a absorção, reduzindo cerca de 25,5% e 14% para as absorções de 2 e 24h respectivamente. Esse resultado pode ser atribuído a ação do calor, que ocasiona a destruição de componentes da parede celular e extrativos, primeiramente pelo constituinte mais hidrófilo que é a hemicelulose (BORGES e QUIRINO, 2004).

Tabela 5. Efeito isolado das variáveis temperatura e dos tempos sob pressão e após pressão sobre as propriedades físicas dos compensados de 12 mm.

Propriedade	Temperatura (°C)		Tempo sob pressão (min)		Tempo após pressão (min)	
	120	150	7	12	15	30
IE2h	33,17 ^a	23,75 ^b	24,97 ^a	32,03 ^b	28,33 ^a	28,88 ^a
IE24h	39,25 ^a	32,06 ^b	31,04 ^a	40,20 ^b	35,26 ^a	36,24 ^a
Abs2h	53,10 ^a	39,56 ^b	46,22 ^a	46,85 ^a	46,22 ^a	46,86 ^a
Abs24h	79,07 ^a	68,05 ^b	71,85 ^a	75,50 ^a	72,65 ^a	74,76 ^a
TNRE	4,68 ^a	9,24 ^b	6,66 ^a	7,10 ^a	6,62 ^a	7,13 ^a
PM	4,68 ^a	6,96 ^b	5,58 ^a	5,97 ^b	5,61 ^a	5,94 ^a
TUE	12,89 ^a	12,56 ^a	12,00 ^a	13,40 ^a	12,80 ^a	12,65 ^a

Letras iguais em linha em cada variável não diferem estatisticamente pela ANOVA a 95% de probabilidade.

Em relação à taxa de não-retorno em espessura, o acréscimo praticamente dobrou com o aumento da temperatura (49,3%). Isto deve-se ao efeito negativo que a alta temperatura causou na qualidade da colagem, uma vez que o adesivo UF é sensível à alta temperatura e umidade. Já para a PM, o aumento deste parâmetro proporcionou um acréscimo de 33%.

O tempo sob pressão afetou a propriedade de inchamento, ou seja, aumentando-se o tempo sob pressão de 7 para 12 minutos, maior foi o inchamento após 2h (22%) e 24h (22,8%). Este aumento deve-se ao maior nível de densificação proporcionado pelo tempo de 12 minutos, o que acaba elevando a tensão de compressão acumulada no material. O maior tempo também proporcionou um aumento na PM (6,5%).

Já o aumento do tempo à pressão zero de 15 para 30 minutos não influenciou nenhuma propriedade física, concluindo-se que o aumento do tempo de pós-tratamento não foi significativo para que as tensões sejam liberadas lentamente e assim fixar a forma final

sem prejudicar o material. Este resultado difere do observado por Kamke e Sizemore (2008), que afirmaram que o pós-tratamento é importante para o aumento da estabilidade dimensional da madeira após a compressão.

O resultado da análise de variância fatorial do efeito da temperatura, do tempo sob pressão e do tempo após a pressão zerada sobre as propriedades físicas é apresentado no Apêndice 3, Tabela 9. Esta análise indicou que para o inchamento após 2 e 24 horas, o efeito da interação entre os fatores temperatura e tempo sob pressão foi discreto, porém significativo.

A análise fatorial também indicou que nestas mesmas propriedades – inchamento em espessura após 2 e 24 horas, o efeito da interação entre a temperatura e tempo a pressão zerada também foi significativo. Observou-se que os maiores valores de inchamento pós 2h foram encontrados nos tratamentos a 120°C, a 15 e 30 minutos à pressão zero (Figura 2). A análise fatorial mostrou que o inchamento diminuiu quando aumentou-se a temperatura para 150°C e diminuiu-se o tempo à pressão zero para 15 minutos. O inchamento foi mais impactado pela mudança de temperatura do que pela mudança de tempo à pressão zero.

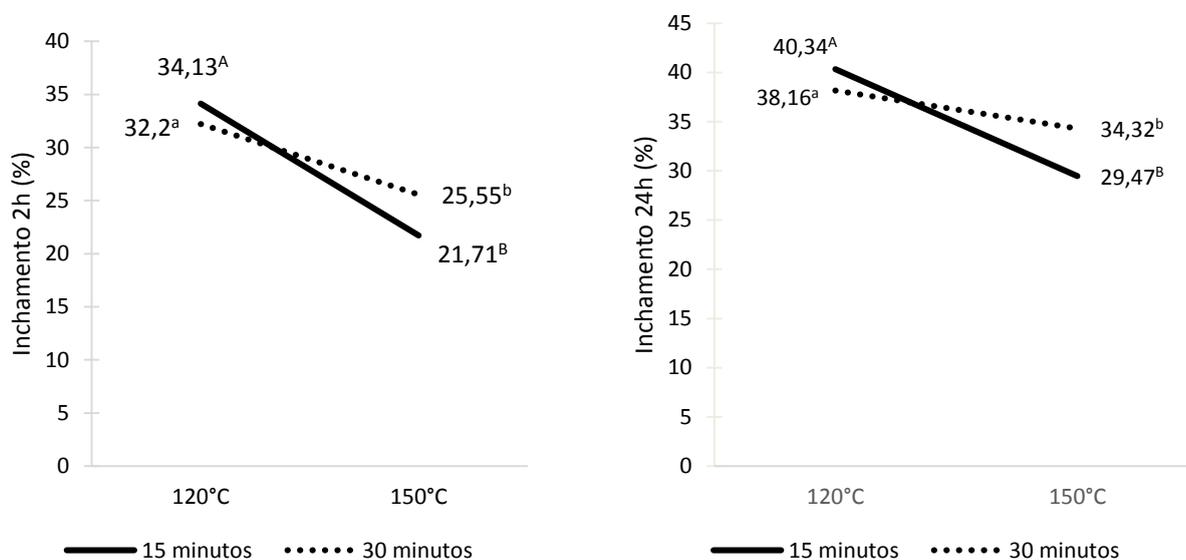


Figura 2. Efeito da interação entre a temperatura e o tempo à pressão zero no inchamento em espessura em 2h e 24h dos compensados de 12 mm. Valores com letras diferentes são estatisticamente diferentes pela ANOVA a 95% de probabilidade.

É possível observar também que os maiores valores de inchamento pós 24h foram novamente encontrados nos tratamentos a 120°C, a 15 e 30 minutos à pressão zero. Esses valores são 40,34% e 38,16% respectivamente. A análise fatorial mostrou que o

inchamento diminuiu quando aumentou-se a temperatura para 150°C e diminuiu-se o tempo a pressão zero para 15 minutos. Essa análise mostrou também que o inchamento foi mais impactado pela mudança de temperatura do que pelo tempo sob pressão.

3.1.4 Propriedades Mecânicas

A análise estatística (Apêndice 2, Tabela 6), detectou a existência de diferenças significativas entre as propriedades mecânicas avaliadas. Observa-se que alguns tratamentos implicaram em pequena redução das propriedades mecânicas dos painéis em comparação com a testemunha, porém não estatisticamente significativa (Tabela 6).

Tabela 6. Valores das propriedades mecânicas dos compensados de 12 mm.

Tratamentos	Propriedades			
	f_M (MPa)	E_M (MPa)	f_H (N)	$f_{gv,0}$ (MPa)
Testemunha	27,63 (17,0)	3245,7 (25,0)	2042,7 (20,0)	2,07 (20,0)
T1 (120°C, 7', 15')	50,37* (6,0)	4112,8 (19,0)	2998,8* (17,0)	1,97 (16,0)
T2 (120°C, 7', 30')	43,55* (17,0)	3585,9 (36,0)	2190,6 (5,0)	1,86 (15,0)
T3 (120°C, 12', 15')	44,63* (16,0)	3235,7 (26,0)	2961,9* (7,0)	1,6 (15,0)
T4 (120°C, 12', 30')	40,69* (18,0)	2990,9 (27,0)	3141,8* (11,0)	2,03 (11,0)
T5 (150°C, 7', 15')	38,42* (10,0)	3407,6 (24,0)	1997,2 (16,0)	1,19 (49,0)
T6 (150°C, 7', 30')	31,76 (11,0)	2722,2 (14,0)	1856,8 (16,0)	1,83 (14,0)
T7 (150°C, 12', 15')	45,05* (18,0)	3507,7 (25,0)	2505,3 (4,0)	1,22 (17,0)
T8 (150°C, 12', 30')	53,87* (15,0)	4139,4 (23,0)	2616,5* (9,0)	1,46 (18,0)

(*) na mesma coluna indica valores estatisticamente diferentes da testemunha pelo teste Dunnett a 5% de significância. Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%). f_M : Módulo de ruptura; E_M : Módulo de elasticidade; f_H : Dureza Janka; $f_{gv,0}$: Cisalhamento na linha de cola.

Em relação ao módulo de ruptura (f_M), todos os tratamentos afetaram de maneira positiva na resistência do material, que foi de 27,63 MPa (testemunhas) até 53,87 MPa no tratamento mais severo e longo (T8: 150°C por 12 minutos e depois 30 minutos sem

pressão), representando um aumento de 95% desta propriedade.

Já o módulo de elasticidade (E_M) não foi influenciado por nenhum dos tratamentos, mantendo-se estatisticamente igual à testemunha. Ainda assim, não houve uma tendência clara para este efeito, ou seja, maior temperatura e tempo do tratamento não implicaram necessariamente no incremento da rigidez do material. A densificação causada pela compressão mecânica e facilitada pela temperatura é o que usualmente contribui para o aumento da rigidez do compensado, pois ocorre a redução dos espaços vazios, aumentando a proporção de massa em relação ao volume. Os resultados destas duas propriedades (f_M e E_M) foram superiores aos obtidos por Arruda et al. (2011), ao tratar termicamente compensados de paricá a 150°C por 5, 10 e 15 minutos.

O aumento nos módulos de elasticidade e ruptura é amplamente retratado nos trabalhos, principalmente ao aumentar a massa específica do material (KAMKE, 2006; SUNDQVIST et al., 2006; GÁBORÍK et al., 2011;). Hillis (1984) e Yildiz et al. (2006) comentam que utilizando apenas tratamentos térmicos, sem influência da compressão, o módulo de ruptura é geralmente mais afetado que o módulo de elasticidade. No entanto, este foi o efeito alcançado mesmo utilizando a pressão juntamente com calor. Dessa forma, o tratamento 8 foi até vantajoso para a flexão estática do compensado, pois deixou o material mais resistente à carga de ruptura sem diminuir a resistência à deformação elástica.

A dureza dos compensados aumentou ou se manteve estatisticamente igual a testemunha com o tratamento termomecânico. Este aumento atribui-se ao aumento da massa específica do material (UNSAI et al., 2011) e outros autores notaram este mesmo comportamento (ARRUDA, 2012; CANDAN et al., 2013; DOGU et al., 2010). O teste de Dunnett mostrou que quatro tratamentos diferiram significativamente em dureza da testemunha, apresentando valores superiores (tratamentos 1, 3, 4 e 8). Os demais tratamentos se mantiveram estatisticamente igual a testemunha. Para esta propriedade também não houve uma tendência clara para o efeito dos tratamentos térmicos na f_H , ou seja, maior temperatura e tempo do tratamento não implicaram necessariamente no incremento da dureza do material.

Observou-se para resistência ao cisalhamento na linha de cola dos compensados que não houve diferenças significativas entre os tratamentos. Ou seja, nenhum tratamento termomecânico aumentou a resistência, ficando todos abaixo do valor médio apresentado pela testemunha (2,07 MPa).

A variação de comportamento das propriedades mecânicas dos compensados refletiu em

variação da eficiência do tratamento (Tabela 7). Nota-se que o comportamento das diferentes propriedades foi muito distinto, sendo evidente que algumas são mais resistentes ao tratamento, tal como E_M (6,72%), enquanto outras são mais sensíveis, como o f_M (57,60%). Porém, de maneira geral, o tratamento térmico significou um aumento parcial das propriedades mecânicas dos painéis.

Tabela 7. Eficiência (%) do tratamento termomecânico sobre as propriedades mecânicas dos compensados de 12 mm.

Tratamentos	Propriedades			
	f_M	E_M	f_H	$f_{gv,0}$
T1 (120°C, 7', 15')	82,32	26,72	46,80	-4,89
T2 (120°C, 7', 30')	57,62	10,56	7,24	-10,12
T3 (120°C, 12', 15')	61,53	-0,31	45,00	-19,32
T4 (120°C, 12', 30')	47,27	-7,79	53,81	-1,89
T5 (150°C, 7', 15')	39,06	5,04	-2,23	-42,66
T6 (150°C, 7', 30')	14,94	-16,12	-9,10	-11,74
T7 (150°C, 12', 15')	63,04	8,09	22,64	-41,23
T8 (150°C, 12', 30')	94,98	27,60	28,09	-29,54
Média	57,60	6,72	24,03	-20,17

Os três fatores (temperatura, tempo sob pressão e tempo sem pressão) e dois níveis cada (120°C e 150°C; 7 e 12 minutos; 15 e 30 minutos) foram analisados isoladamente para identificar o efeito de cada um sobre as propriedades mecânicas (Tabela 8). Pode-se observar que o aumento da temperatura isoladamente não afetou a resistência nem a rigidez. Porém há uma tendência de redução do valor da dureza Janka e do cisalhamento na linha de cola. Ou seja, a dureza reduz cerca de 20,5% e o cisalhamento reduz 27% quando aumenta a temperatura de 120 para 150°C. O contrário ocorre com a dureza ao aumentar o tempo sob pressão de 7 para 12 minutos: o efeito nesta propriedade é de acréscimo de 19,4%. Além disso, esta variável isoladamente não influenciou nenhuma outra propriedade mecânica.

Tabela 8. Efeito isolado das variáveis temperatura e dos tempos sob pressão e após pressão sobre as propriedades mecânicas dos compensados de 12 mm.

Propriedades	Temperatura (°C)		Tempo sob pressão (min)		Tempo após pressão (min)	
	120	150	7	12	15	30
f_M	44,81 ^a	42,27 ^a	41,02 ^a	46,06 ^a	44,61 ^a	42,46 ^a
E_M	3482,4 ^a	3445,5 ^a	3458,2 ^a	3469,6 ^a	3566,5 ^a	3361,3 ^a
f_H	2823,2 ^a	2243,9 ^b	2260,8 ^a	2806,3 ^b	2615,7 ^a	2451,4 ^a
$f_{gv,0}$	1,92 ^a	1,40 ^b	1,64 ^a	1,68 ^a	1,58 ^a	1,74 ^a

Letras iguais em linha em cada variável não diferem estatisticamente pela ANOVA a 95% de probabilidade.

O resultado da análise de variância fatorial do efeito da temperatura, tempo sob pressão e tempo após a pressão zerada sobre as propriedades físicas é apresentado no Apêndice 3, Tabela 10. A análise indicou que para as propriedades f_M e E_M , o efeito da interação entre os fatores temperatura e tempo sob pressão foi significativo. Observa-se que usando uma maior temperatura e um maior tempo sob pressão consegue-se um f_M mais elevado (49,46 MPa). Utilizando a temperatura mais alta por um tempo menor sob pressão tem-se um efeito mais decisivo para a redução do f_M (35,08 MPa), ocorrendo o inverso quando utilizou-se a temperatura mais alta por um tempo maior sob pressão: o aumento do f_M para 49,46 MPa (Figura 3).

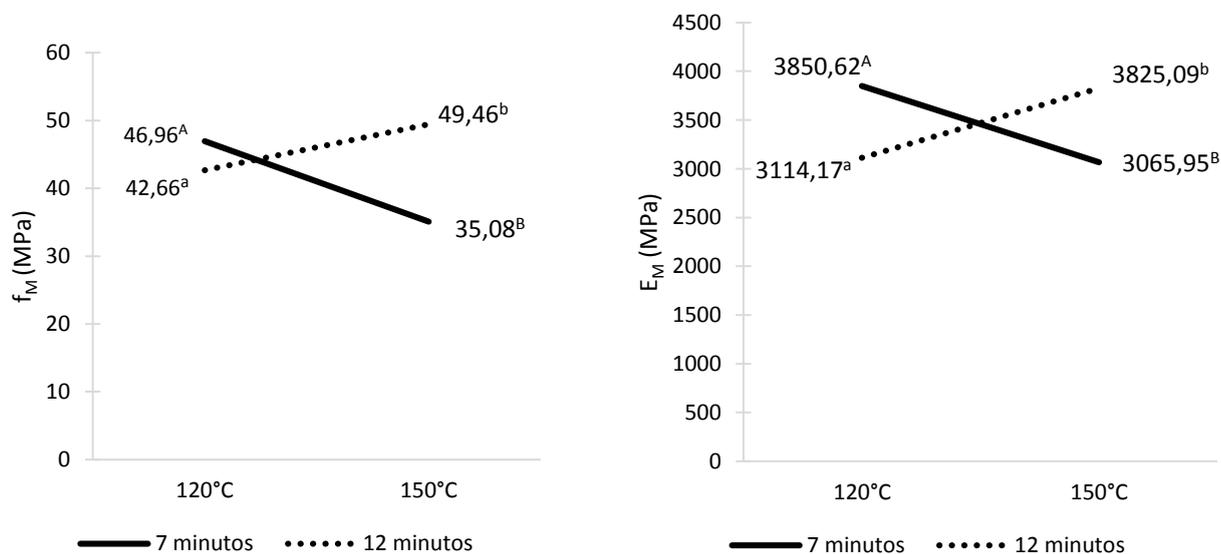


Figura 3. Efeito da interação entre a temperatura e o tempo sob pressão no módulo de ruptura (f_M) e no módulo de elasticidade (E_M) dos compensados de 12 mm. Valores com letras diferentes são estatisticamente diferentes pela ANOVA a 95% de probabilidade.

O mesmo raciocínio é empregado para explicar o efeito da interação no E_M : com uma menor temperatura e um menor tempo sob pressão consegue-se um E_M mais elevado (3850,62 MPa). Porém, ao aumentar a temperatura para 150°C, tem-se o seu menor valor, de 3065,95 MPa. Essa análise mostrou que o E_M foi impactado pela mudança de tempo sob pressão e pela mudança de temperatura de forma equilibrada.

3.2 PAINÉIS COMPENSADOS DE 20 MM DE ESPESSURA

Após a determinação das propriedades físicas e mecânicas do compensado de 12 mm termomecanicamente tratado, procedeu-se análise estatística dos dados e a partir das informações obtidas e as informações já obtidas no pré-teste, escolheu-se dois dentre os oito tratamentos, sendo eles então aplicados nos compensados de 20 mm de espessura. Os tratamentos escolhidos estão detalhados na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9. Tratamentos termomecânicos aplicados nos compensados de 20 mm.

Tratamentos	Temperatura	Pressão	Tempo sob pressão (min.)	Tempo sob pressão zerada (min.)
1	120°C	50%	7	15
2	150°C			

Estes dois tratamentos foram escolhidos inicialmente com base na análise quantitativa do efeito de cada variável sobre cada uma das propriedades analisadas, físicas e mecânicas, após extensiva análise estatística. Posteriormente efetuou-se uma análise qualitativa, para verificar se as melhorias trazidas pelos tratamentos eram estatisticamente importantes, afinal, quanto maior a temperatura e tempo gasto no processo, mais oneroso ele se torna. Isto posto, escolheu-se examinar as duas temperaturas (120°C e 150°C), à pressão de 50% da resistência à compressão perpendicular ($f_{c,90^\circ}$) da madeira de paricá por 7 minutos, e o pós-tratamento foi de 15 minutos. Portanto, a temperatura foi a única fonte de variação entre os dois tratamentos. Foram efetuadas as mesmas análises nas propriedades feitas nos compensados de 12 mm, e os resultados são discutidos a seguir.

3.2.1 Massa Específica e Taxa de Compressão

A Tabela 10 apresenta as características dos compensados antes e após os tratamentos. Observa-se que a massa específica de 0,48 g/cm³ para as testemunhas variou significativamente após os tratamentos, ficando em média 0,56 g/cm³. A densificação acontece pela redução do

volume da madeira causada pela redução da sua espessura, portanto a taxa de compressão (TC) é uma outra forma de quantificar a densificação do material. A TC variou significativamente, em média 31,69% para os tratamentos.

Tabela 10. Massa específica (ME) e taxa de compressão (TC) das testemunhas e das amostras de compensado de 20 mm tratadas.

Tratamento	ME (g/cm ³)	TC (%)
Testemunha	0,48 (5,31)	-
T1 (120°C, 7', 15')	0,59 (5,07)	28,51 (4,66)
T2 (150°C, 7', 15')	0,64 (7,86)	34,88 (11,41)
Média dos tratamentos	0,56	31,69

Apesar da impossibilidade de se comparar os dois tipos de compensados testados (12 e 20 mm de espessura) devido aos seus diferentes parâmetros de fabricação, número de lâminas e outras possíveis fontes de variação, observou-se uma elevada taxa de compressão para os dois materiais resultando em aumento na massa específica. Bekhta e Marutzky (2007) conseguiram uma TC de 33% usando uma pressão de 15 N/mm² a 200°C em lâminas de *beech* (*Fagus* sp.). Arruda (2012) tratando termicamente lâminas de amescla, obteve uma TC que variou entre 10,54%, obtida no tratamento de 140°C por um minuto, e 15,51%, no tratamento de 180°C por dois minutos.

Kutnar e Sernek (2007) explicam que o aumento na massa específica após um tratamento de densificação dependerá de diversos fatores como o tipo de madeira, espessura do produto, a forma em que a madeira está no produto (formato e tamanho das partículas) e tratamentos aplicados (pressão e/ou tratamento térmico). Segundo estes autores, de forma geral, o aumento na massa específica ocorre na taxa de 25 a 500%, sendo preferencial ocorrer até a uma taxa de 200%.

3.2.2 Temperatura x Tempo

O primeiro ajuste atribuiu-se ao acomodamento do painel na prensa, mas observou-se a ocorrência do dobro do número de ajustes (Tabela 3 do Apêndice 4) que ocorreram no compensado de 12 mm. O segundo ajuste ocorreu 6 segundos depois no tratamento 1 (120°C) a 51,9°C, e 4 segundos depois no tratamento 2 (150°C) a 53,1°C, indicando que esta possivelmente é a faixa da temperatura de transição vítrea para

o teor de umidade da madeira no momento do tratamento.

A Figura 4 mostra a evolução da temperatura no interior dos compensados durante o tratamento térmico. É possível observar como, de maneira geral, a evolução da temperatura interna do painel ocorreu de forma mais suave quando comparado com os compensados de 12 mm, devido eventualmente à maior espessura deste material.

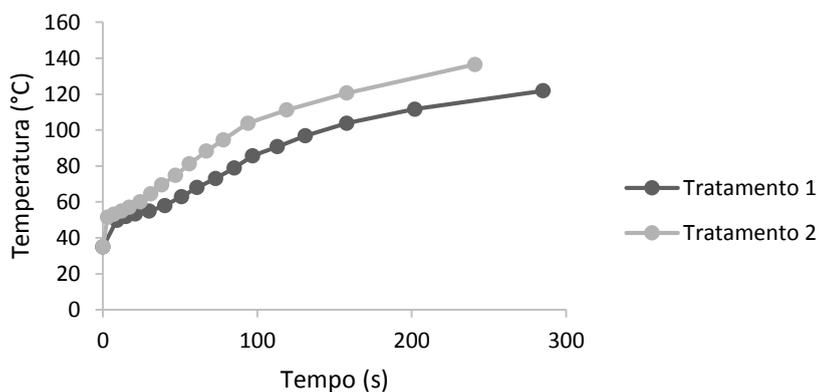


Figura 4. Evolução da temperatura interna durante os tratamentos termomecânicos nos compensados de 20 mm. Tratamento 1: 120°C, 7', 15'; Tratamento 2: 150°C, 7', 15'.

A primeira fase vai do início dos tratamentos até aproximadamente 80°C. Novamente percebeu-se uma evolução mais rápida nos tratamentos a 150°C. À temperatura de 120°C são necessários em média 2 minutos e 17 segundos para alcançar 100°C no interior do painel, enquanto que a 150°C somente 1 minuto e 33 segundos. As outras fases ficam praticamente indistinguíveis, porém é possível perceber que quando o painel atinge 90 - 100°C no tratamento 1 e 100 - 110°C no tratamento 2, ocorre a redução na evolução da sua temperatura interna, o que pode ser observado pela leve redução na inclinação da reta. Com isso tem-se a segunda fase, onde a temperatura do painel passa a aumentar muito lentamente. Logo em seguida, de maneira praticamente imperceptível, tem-se o início da terceira fase, pois a sua temperatura interna continua a se elevar, embora mais lentamente que na 1ª fase, e sua duração vai até o painel atingir temperatura próxima do tratamento. Nesta fase, a inclinação da reta é ainda mais reduzida.

3.2.3 Propriedades Físicas

A análise estatística (Apêndice 2, Tabela 7), detectou a existência de diferenças significativas entre as propriedades físicas avaliadas. Observando as propriedades de inchamento de 2 e 24h, absorção de 2 e 24h e TNRE, nota-se que os painéis tratados se tornaram mais instáveis dimensionalmente em comparação com as testemunhas, indicando que os tratamentos termomecânicos aplicados alteraram as relações entre a água e madeira (Tabela 11). Uma das complicações geradas pelo tratamento térmico é a dificuldade na análise no comportamento térmico de seus componentes e suas subsequentes propriedades, devido às grandes alterações em sua estrutura química e anatômica. Sabe-se que reduzindo a capacidade da madeira em absorver água ocorre a melhoria na estabilidade dimensional, porém não foi o que ocorreu nos materiais testados.

Tabela 11. Propriedades de estabilidade dimensional dos compensados de 20 mm.

Tratamento	Propriedades (%)						
	IE2h	IE24h	ABS2h	ABS24h	TUE	PM	TNRE
Testemunha	2,19 (9,0)	3,17 (7,0)	30,29 (13,0)	59,58 (7,0)	11,02 (2,0)	-	2,41 (4,0)
T1 (120°C, 7', 15')	16,62* (37,0)	22,85* (29,0)	38,21* (20,0)	67,67* (10,0)	10,43* (3,0)	6,63 (90,0)	8,84* (6,0)
T2 (150°C, 7', 15')	20,32* (16,0)	27,50* (11,0)	38,54* (13,0)	70,52* (5,0)	9,61* (2,0)	9,99 (68,0)	10,58* (9,0)

(*) na mesma coluna indicam valores estatisticamente diferentes da testemunha pelo teste Dunnett a 5% de significância. Este teste não foi realizado para os valores da propriedade perda de massa (PM) pois eles não foram coletados nas testemunhas. Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%). IE2h: Inchamento após 2h; IE24h: Inchamento após 24h; ABS2h: absorção de água após 2h; ABS24h: absorção de água após 24h; TUE: teor de umidade em equilíbrio; PM: perda de massa; TNRE: taxa de não retorno em espessura.

O TUE respondeu bem aos tratamentos térmicos, sendo reduzido após os tratamentos, e conforme Del Menezzi (2004), esta propriedade relaciona o montante de moléculas de água adsorvida nos sítios dos grupos hidroxila da parede celular, e deste modo, o que se conclui é que os tratamentos térmicos reduziram estes sítios em tal magnitude que implicou na redução do TUE. Além disso, o tratamento térmico altera a estrutura dos polímeros da madeira, tornando-os menos higroscópicos ou mesmo transformando-os quimicamente.

A perda de massa (PM) nos compensados foi em média de 6,63% no tratamento 1 (120°C) e de 9,99% no tratamento 2 (150°C). Como a PM não foi aferida nas testemunhas,

não realizou-se o teste Dunnett, que as compara com as amostras tratadas. No entanto, segundo a análise de variância, elas variaram significativamente entre si. É possível observar que em nenhum dos tratamentos a PM foi maior que o TU antes dos tratamentos, indicando que não houve calor suficiente para degradar algum dos componentes químicos da madeira.

Os valores da TNRE dos compensados tratados foram significativamente maiores que a testemunha, que teve uma TNRE média de 2,41% enquanto os tratados apresentaram valores de 8,84% e 10,58% (tratamentos 1 e 2 respectivamente). Como a TNRE representa o inchamento provocado pela liberação das tensões, os compensados tratados acumularam as tensões das lâminas e por isso a TNRE dos tratados foi maior. Além disso, em materiais colados, a liberação das tensões de compressão ocasiona a perda da qualidade da colagem e nesse sentido a qualidade do adesivo é importante para manter o painel colado e limitar a liberação das tensões (MOHEBBY et al., 2009).

Os valores de TNRE foram relativamente baixos em comparação à taxa de compressão, que está em média acima de 30%. Isto significa que, embora a liberação das tensões de compressão tenha importância ao analisar o inchamento, ela não é a única variável a ser levada em consideração. Novamente o fato do adesivo UF ter sido utilizado na confecção dos compensados, que apresenta baixa resistência à umidade e temperatura altas, influenciou a qualidade da colagem e, portanto, o inchamento.

Valores mais elevados de TNRE também implicam em redução da massa específica do painel, pois a sua espessura, após o ensaio de inchamento e posterior secagem, é aumentada. Isso ocorre porque a massa dos painéis não é afetada no ensaio de inchamento, mas o volume ocupado por ela aumenta, reduzindo assim sua massa específica. A Tabela 2 (Apêndice 5) apresenta os dados da massa específica após o tratamento e após o ensaio de inchamento e secagem em estufa dos compensados. Lá é possível observar que os compensados tratados a 150°C (tratamento 2) sofreram uma redução ligeiramente maior de massa específica, quando comparados com os valores iniciais, que os tratados a 120°C (tratamento 1). Em uma perspectiva prática, isso acarreta em uma possível redução das propriedades de resistência, comprometendo o comportamento estrutural do painel. Além disso, como dito anteriormente, a qualidade da colagem foi severamente afetada tanto pela umidade como o calor, e a liberação das tensões desenvolvidas também contribuíram para o inchamento em espessura dos compensados tratados.

Os resultados da Tabela 12 mostram a eficiência do tratamento em melhorar as propriedades físicas do material. Todos os valores foram negativos – exceto para o TUE - indicando que os tratamentos não foram eficientes na melhoria da estabilidade dimensional dos painéis tratados.

Tabela 12. Eficiência (%) do tratamento sobre as propriedades de estabilidade dimensional dos compensados de 20 mm.

Tratamentos	Propriedades					
	IE2h	IE24h	ABS2h	ABS24h	TUE	TNRE
T1 (120°C, 7', 15')	-660,36	-621,96	-26,12	-13,58	5,35	-266,80
T2 (150°C, 7', 15')	-829,49	-768,88	-27,21	-18,37	12,79	-339,00

O aumento da temperatura causou um efeito significativo em apenas duas propriedades, o aumento na taxa de não-retorno da espessura, e a redução no teor de umidade (Tabela 13). O aumento da TNRE deve-se ao efeito negativo que a alta temperatura causa na qualidade da colagem, uma vez que o adesivo UF é sensível à alta temperatura e umidade. Com a redução no teor de umidade, pode-se concluir que quanto maior foi a temperatura, maior foi a eliminação da água presente no material.

Tabela 13. Efeito da temperatura sobre as propriedades físicas dos compensados de 20 mm.

Propriedade	Temperatura (°C)	
	120	150
IE2h	16,62 ^a	20,32 ^a
IE24h	22,85 ^a	27,50 ^a
Abs2h	38,21 ^a	38,54 ^a
Abs24h	67,67 ^a	70,52 ^a
TNRE	8,84 ^a	10,58 ^b
PM	6,63 ^a	9,99 ^a
TUE	10,43 ^a	9,61 ^b

Letras iguais na mesma variável não diferem estatisticamente pela ANOVA a 95% de probabilidade.

3.2.4 Propriedades Mecânicas

A análise estatística (Apêndice 2, Tabela 8), mostrou a existência de diferenças significativas entre as propriedades mecânicas avaliadas. Observa-se que em algumas propriedades os tratamentos implicaram em aumento estatisticamente significativo em comparação com a testemunha (Tabela 14).

Tabela 14. Valores das propriedades mecânicas dos compensados de 20 mm.

Tratamentos	Propriedades			
	f_M (MPa)	E_M (MPa)	f_H (N)	$f_{gv,0}$ (MPa)
Testemunha	26,50 (6,0)	3161,4 (12,0)	1639,2 (18,0)	0,79 (15,0)
T1 (120°C, 7', 15')	33,80* (20,0)	4443,4 (41,0)	1954,1* (15,0)	1,35* (28,0)
T2 (150°C, 7', 15')	40,23* (15,0)	5066,7 (38,0)	2126,1* (15,0)	1,05 (39,0)

(*) na mesma coluna indicam valores estatisticamente diferentes pelo teste Dunnett a 5% de significância. Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%). f_M : Módulo de ruptura; E_M : Módulo de elasticidade; f_H : Dureza Janka; $f_{gv,0}$: Cisalhamento na linha de cola.

Os tratamentos térmicos melhoraram as propriedades mecânicas analisadas, exceto o E_M . O módulo de ruptura (f_M) foi de 26,50 MPa (testemunha) para 33,80 MPa no tratamento a 120°C e 40,23 MPa no tratamento a 150°C, representando um aumento de 27,5% e 51,8% respectivamente. Sabe-se que a taxa de compressão influencia diretamente o módulo de ruptura (BEKHTA et al., 2009). Já o módulo de elasticidade (E_M), como ocorreu nos painéis de 12 mm, não foi influenciado pelos tratamentos, mantendo-se estatisticamente igual à testemunha. No entanto, houve uma tendência clara para este efeito, ou seja, quanto maior a temperatura, maior o incremento da rigidez do material. Os resultados destas duas propriedades (f_M e E_M) foram superiores aos obtidos por Arruda et al. (2011), ao tratar termicamente compensados de paricá a 150°C por 5, 10 e 15 minutos.

O teste de Dunnett mostrou que tanto o tratamento a 120°C como o tratamento a 150°C aumentaram significativamente a dureza dos compensados, alcançando o valor de 1954,1 N e 2126,1 N, respectivamente. Concluiu-se, portanto, que os tratamentos foram eficientes no fechamento de vasos e lumens. Aumentos significativos na dureza devido a densificação têm sido observados em outros trabalhos (FANG et al, 2011; INOUE et al., 1993; KAMKE, 2006).

No ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola, apenas o tratamento 1 afetou significativamente a resistência dos compensados, sendo que na testemunha a $f_{gv,0}$ foi de 0,79 MPa e aumentou para 1,35 MPa quando aplicou-se este tratamento. Ao aplicar o tratamento a 150°C a $f_{gv,0}$ foi de 1,05 MPa. Por se tratarem de materiais comerciais, presume-se que a colagem foi bem realizada, e a resistência verificada para cisalhamento na

linha de cola foi determinada fundamentalmente pela resistência da madeira das lâminas adjacentes ao plano de colagem, a qual sofreu algum tipo de influência do tratamento termomecânico.

Nota-se que o comportamento das diferentes propriedades é muito distinto, refletindo em variação na eficiência do tratamento; é evidente que algumas são mais resistentes ao tratamento, tal como a dureza Janka (24,46%), enquanto outras são mais sensíveis, como o cisalhamento na linha de cola (51,20%) (Tabela 15). No geral, o tratamento térmico significou um aumento das propriedades mecânicas dos painéis.

Tabela 15. Eficiência (%) do tratamento sobre as propriedades mecânicas dos compensados de 20 mm.

Tratamentos	Propriedades			
	$f_M //$	$E_M //$	f_H	$f_{gv,0}$
T1 (120°C, 7', 15')	27,54	40,55	19,21	70,17
T2 (150°C, 7', 15')	51,81	60,27	29,71	32,23
Média	39,68	50,41	24,46	51,20

Pode-se observar que o aumento da temperatura não afetou significativamente nenhuma das propriedades mecânicas analisadas (Tabela 16). Ainda assim, nota-se uma clara tendência ao aumento das mesmas quando se eleva a temperatura do tratamento, exceto para o cisalhamento na linha de cola. Isto ocorre provavelmente ao efeito negativo que a alta temperatura causa na qualidade da colagem, uma vez que o adesivo UF é sensível à alta temperatura e umidade.

Tabela 16. Efeito da temperatura sobre as propriedades mecânicas dos compensados de 20 mm.

Propriedade	Temperatura (°C)	
	120	150
f_M	33,80 ^a	40,23 ^a
E_M	4443,4 ^a	5066,7 ^a
f_H	1954,1 ^a	2126,1 ^a
$f_{gv,0}$	1,35 ^a	1,05 ^a

Letras iguais em linha em cada propriedade não diferem estatisticamente pela ANOVA a 95% de probabilidade.

4. CONCLUSÃO

- A estratégia de densificação de compensados causou um efeito positivo sobre as propriedades mecânicas, os tornando mais resistentes;
- Por outro lado, os compensados tratados da forma proposta tornaram-se instáveis dimensionalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods of evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. ASTM D 1037 Annual book of ASTM standards, v. 15.03. ASTM, West Conshohocken, PA. 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. ASTM D 4442 Annual Book of ASTM Standards, v. 04.09. ASTM, West Conshohocken, PA. 2001.

ARRUDA, L. M. Modificação termomecânica da madeira de amescla (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.): efeito sobre as propriedades de lâminas e compensados. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, 2012.

ARRUDA, L. M. et al. Estudo preliminar das propriedades de compensados produzidos com lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) modificadas termomecanicamente. *Ciência da Madeira*, v. 02, n. 01, p. 29–42, 2011.

ARRUDA, L. M.; DEL MENEZZI, C. H. S. Thermomechanical treatment of tropical wood – Final Report. Associação Nacional dos Produtores de Piso de Madeira, 2013. 23p.

BEKHTA, P.; MARUTZKY, R. Reduction of glue consumption in the plywood production by using previously compressed veneer. *European Journal of Wood and Wood Products*, v.65, n.1, p.87-88, 2007.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P.; SEDLIACIK, J. Effect of Pre-Pressing of Veneer on the Glueability and Properties of Veneer-Based Products. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 70, n.1-3, p. 99-106. 2012.

BORGES, M.L.; QUIRINO, W.F. Higroscopicidade da Madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. *Revista Biomassa e Energia*, v.1, n.2, p. 71-73, 2005.

CANDAN, Z.; KORKUT, S.; UNSAL, O. Effect of thermal modification by hot pressing on performance properties of paulownia wood boards. *Industrial Crops and Products*, v. 45, p. 461–464, fev. 2013.

CIFLORESTAS. Área plantada do Paricá. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/dado.php?id=74>>. Acesso em julho de 2013.

COSTA, M.A.; DEL MENEZZI, C.H.S. Thermomechanical Modification Effects on Parica (*Schizolobium amazonicum*) Plywood Properties. In: European Conference on Wood Modification, 7. **Anais**... Lisboa, Portugal, 2014.

CURRIER, R. A. Compression of white-pocket veneer in hot-pressed douglas-fir plywood. *Forest Product Journal*, v.10, n.8, p. 409-415, 1960.

CURRIER, R. A. Compressibility and bond quality of western softwood veneers. *Forest Product Journal*, v.13, n.2, p. 71-80, 1963.

DEL MENEZZI, C. H. S. Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB). Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, 2004.

DOGU, D. et al. Anatomical investigation of thermally compressed wood panels. *BioResources*, v. 5, n. 4, p. 2640–2663, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Plywood: bonding quality. Part 1: Test methods. Brussels, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Plywood: bonding quality. Part 2: Requirements. Cambridge, 1993.

FANG, C.H. et al. Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 70, n. 1-3, p. 155–163, 1 fev. 2011.

FANG, C.H. et al. Densification of wood veneers combined with oil- heat treatment. Part II: hygroscopicity and mechanical properties. *BioResources*, v. 7, n. 1, p. 925–935, 2012.

GÁBORÍK, J. et al. Properties of compressed laminated beech wood by bending stress. *Forestry and Wood Technology*, n. 74, p. 63–68, 2011.

HILLIS, W.E. High temperature and chemical effects on wood stability Part 1: General considerations. *Wood Sci. Technol.*, v.18, p.281 – 293, 1984.

HORVATH, B. et al. Thermal softening of transgenic aspen. *BioResources*, v. 6, n. 2, p. 2125–2134, 2011.

HSU, W.E. Wood quality requirements for panel products. IUFRO INTERNATIONAL WOOD QUALITY WORKSHOP, 1997, Quebec. **Proceedings...** Viena: IUFRO, 1997. 4p.

HSU, W.E.; SCHWALD, W.; SHIELDS, J.A. Chemical and physical changes required for producing dimensionally stable wood-based composite. Part 2: heat post-treatment. *Wood Sci Technol*, v. 23, p.281–288, 1989.

IBAMA. Banco de dados de madeiras brasileiras. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/lpf/madeira>>. Acesso em: set. 2013.

INOUE, M. et al. Steam or heat fixation of compressed wood. *Wood and Fibre Science*, v. 25, p. 224-235, 1993.

INOUE, M. et al. Fixation of compressive deformation in wood by pre-steaming. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 20, n. 4, p. 273–281, 2008.

ITO, Y. et al. Compressive-Molding of Wood by High-Pressure Steam- Treatment. Part 2: Mechanism of Permanent Fixation. *Holzforschung*, v. 52, p. 217–221, 1998.

IWAKIRI, S.; ZELLER, F.; PINTO, J.A.; RAMIREZ, M.G.L.; SOUZA, M.M.; SEIXAS, R. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis aglomerados. *Acta Amazônica*, v.42, n.2, p.303-308, 2010.

KAMKE, F. A. VTC Wood – the next generation wood product. Corvallis: Oregon State University, 2006.

KAMKE, F.A.; SIZEMORE, H. Viscoelastic thermal compression of wood. United States Patent US 7,404,422. 2008.

KOLLMANN, F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. *Springer*, 1955.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. Principles of wood science and technology II: wood based materials. New York: Spring; Berlin: Verlag, 1975. 703 p.

KUROWSKA, A. et al. Veneer Densification as a Tool for Shortening of Plywood Pressing Time. *Drvna Industrija*, v. 61, n. 3, p. 193–196, 2010.

KUTNAR, A.; KAMKE, F. A. Compression of wood under saturated steam, superheated steam, and transient conditions at 150°C, 160°C, and 170°C. *Wood Science and Technology*, v. 46, n. 1-3, p. 73–88, 8 out. 2010.

KUTNAR, A.; SERNEK, M. Densification of wood. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, v.82, p. 53–62, 2007.

MARRA, A. A. Technology of wood bonding: principle in practice. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 454p. 11-103p.

MOHEBBY, B.; GORBANI-KOKANDEH, M.; SOLTANI, M. Springback in Acetylated Wood Based Composites. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 9, p. 3103-3106, 2009.

MORSING, N. Densification of wood - The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain. Department of structural engineering and materials technical university of Denmark, v.79, 138 pp., 2000.

ROWELL, R. M.; YOUNGS, R. L. Dimensional Stabilization of Wood in Use. Forest Products Laboratory. Madison, WI, 8pp. 1981 (Gen. Tech. Rep. FPL-0243).

SALIM, N. et al. Effect of Steaming on Some Properties of Compressed Oil Palm Trunk Lumber. *BioResources*, v. 8, n. 2, p. 2310–2324, 2013.

SKAAR, C. Wood-Water Relations. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 263 p.

SKYBA, O. Durability and physical properties of thermo-hygro-mechanically (THM) densified wood. Tese (Doutorado). Ucrânia, 2008. 167p.

STARK, N.M.; CAI, Z.; CARLL, C. Wood-Based Composite Materials Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood–Nonwood Composite

Materials. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. *Wood handbook—Wood as an engineering material*. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508 p.

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, p. 549–561, 2006.

TSOUMIS, G. Science and technology of wood - structure, properties, utilization. New York. Chapman & Hall, 1991. 494p.

UNSAI, O. et al. Effect of Thermal Compression Treatment on the Surface Hardness, Vertical Density Propile and Thickness Swelling of Eucalyptus Wood Boards by Hot-pressing. *Mokchae Konghak*, v. 39, n. 2, p. 148–155, 2011.

YAN, L.; JIN-ZHEN, C.; XIAO-JUAN, J. Deformation fixation, mechanical properties and chemical analysis of compressed *Populus cathayana* wood pretreated by glycerin. *Forestry Studies in China*, v. 12, n. 4, p. 213–217, 2010.

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

EFEITO DA DENSIFICAÇÃO DURANTE A PRENSAGEM SOBRE AS PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS DE PARICÁ (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke)

1. INTRODUÇÃO

Uma das espécies nativas que os empresários do setor florestal e madeireiro da Amazônia passaram a investir em implantação de florestas plantadas é o *Schizolobium amazonicum*, conhecido como paricá, que demonstrou ser uma excelente alternativa do ponto de vista silvicultural, além de produzir madeira com características tecnológicas favoráveis à produção de lâminas e painéis de madeira (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS, 2007).

O paricá é uma espécie de madeira tropical que apresenta um rápido crescimento, pode ser implantada em plantios homogêneos ou consorciados, e apresenta vantagens de ser resistente ao ataque de pragas e doenças. A sua produtividade média anual é na faixa de 20 a 30 m³/ha/ano, estando na mesma faixa de crescimento das espécies de pinus que é de 25 a 30 m³/ha/ano, e superior a teca com 15 a 20 m³/ha/ano (SBS, 2007).

As limitações relacionadas à baixa massa específica da madeira do paricá e aos pequenos diâmetros das árvores desta espécie podem ser minimizadas com uso de tecnologias de colagem para fabricação de produtos de madeira reconstituída, como painéis laminados de madeira (IWAKIRI et al., 2010).

O painel de lâminas paralelas é um produto desenvolvido nos EUA na década de setenta, com denominação comercial de LVL (*laminated veneer lumber*). O LVL pode ser definido como um composto estrutural constituído de lâminas de madeira de pequena espessura, com as fibras da madeira orientadas principalmente ao longo do comprimento da peça, no qual a espessura das lâminas não deve exceder a 6,4 mm (ASTM D 5456, 2001). É um composto estrutural da madeira projetado para competir com a madeira serrada, particularmente madeira serrada de grandes dimensões (MCKEEVER, 1997), e tem a vantagem de poder ser produzido a partir de árvores de pequenos diâmetros e convertido em elementos de grandes comprimentos, conforme Tammela (1998). Segundo Smulski et al. (1997), citado por Carvalho (2004), o aproveitamento das toras na produção de LVL é, em média, 12% superior ao aproveitamento médio das toras no desdobro em

madeira serrada. O processo de produção de LVL transforma material de baixa qualidade em produtos de alta qualidade, que podem ter seus valores de resistência pré-estabelecidos e são substitutos da madeira serrada em uma variedade de aplicações estruturais, em que os atributos da madeira sólida são de elevado custo (MATOS, 1997).

De acordo com Pease (1994), outras vantagens que os LVL apresentam em comparação à madeira sólida são: (i) maior resistência – a estrutura reconstituída dos painéis com processo de classificação das lâminas pode conferir propriedades de resistência que podem ser calculadas com precisão; (ii) flexibilidade dimensional – os painéis podem ser fabricados com qualquer largura e comprimento desejado; (iii) utilização de grande variedade de espécies florestais.

A relação direta entre a massa específica da madeira e suas propriedades mecânicas é amplamente conhecida na literatura. Iwakiri et al. (2002), analisando os efeitos do crescimento radial das árvores de *Pinus taeda* na massa específica das lâminas e resistência mecânica dos painéis compensados, constataram que as lâminas obtidas das partes externas da árvore apresentam maior massa específica e os painéis produzidos com essas lâminas dispostas nas capas, apresentaram maiores valores de resistência mecânica. No sentido de aumentar a resistência do LVL produzido com espécies de baixa massa específica, a densificação é um tratamento termomecânico viável. Ela ocorre por meio da aplicação do calor e compressão mecânica na direção perpendicular às fibras, e conduzidos em diversas combinações de tempo, temperatura e pressão aumentam a massa específica da madeira ou do compósito.

Skyba (2008) afirmou que as propriedades mecânicas são proporcionais à massa específica da madeira, logo compósitos de alta densidade são particularmente utilizados em circunstâncias onde a resistência é importante. Após a densificação, madeiras de baixa massa específica podem substituir aquelas de alta massa específica, e estas podem aumentar ainda mais sua resistência por meio deste processo (BLOMBERG et al., 2005).

Na produção de LVL utiliza-se a resina fenol-formaldeído, por ser a mais indicada para fins estruturais em função de suas características de maior resistência e durabilidade em condições extremas de exposição à umidade (MARRA, 1992).

Objetivou-se, nesse sentido, avaliar o efeito de diferentes estratégias de densificação sobre as propriedades físicas e mecânicas de LVL de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke), que foram aplicadas durante a confecção dos mesmos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 CONFECCÃO DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

Os LVLs foram confeccionados a partir de lâminas de paricá com 2 mm de espessura, provenientes da fábrica de compensados e portas “PORTIL - Portas Itinga Limitada®”, localizada no distrito de Bela Vista - Pará.

Diferentemente dos compensados, a densificação dos LVLs se deu no momento da sua confecção, que foi realizado no Laboratório de Tecnologia da Madeira na Fazenda Água Limpa e algumas etapas foram realizadas no Laboratório de Produtos Florestais, vinculado ao Serviço Florestal Brasileiro, em Brasília - DF.

Foi utilizada a resina líquida CASCOPHEN HL-7090 HS, à base de fenol-formol de alta resistência à umidade para a confecção dos painéis. A preparação do adesivo foi feita pela mistura de seus componentes em uma bateadeira, por aproximadamente 10 minutos (Tabela 1). Após a preparação, a viscosidade do adesivo foi determinada por meio do equipamento Copo Ford nº 8, conforme recomendado pelo fabricante da resina.

Tabela 1. Propriedades da resina fenol-formol HL-7090 HS e formulação do adesivo utilizado na confecção dos painéis LVL.

Propriedades	Valores
Teor de sólidos a 105°C (%)	52-54
Viscosidade a 25°C (cP)	400-800
Gel time a 121°C (min)	6-9
Composição	Partes
CASCOPHEN HL-7090 HS	100
Farinha de mesocarpo de babaçu	20
Água	20

Foram utilizadas lâminas de madeira com espessura média de 2 mm, que foram secas em prensa aquecida a 110°C por 15 minutos e a uma pressão de 0,7 MPa com o intuito de reduzir o teor de umidade de 12% para 4 - 6% de umidade, conforme recomendação do fabricante do adesivo para as lâminas. Após a secagem, as lâminas foram cortadas em seções de 25 cm x 40 cm (larg. x comp.), para a posterior confecção dos LVLs. A montagem de cada painel foi feita por meio de sorteio das 8 lâminas que o compuseram, o que tornou o painel aleatorizado ou não-homogêneo (sem classificação das lâminas por classes de resistência).

Posteriormente, a aplicação do adesivo às lâminas foi realizada com uma espátula, em uma só face (linha simples) e com gramatura de 200 g/m². Foi realizada uma prensagem a frio por 40 minutos para assemblagem das lâminas do colchão e em seguida, foi feita a prensagem à quente à 150°C e três níveis de pressão (1 MPa, 1,47 MPa e 2,94 MPa) por 20 minutos, caracterizando assim os diferentes tratamentos avaliados (Tabela 2). As pressões de 1,47 e 2,94 MPa foram escolhidas por se tratarem respectivamente dos valores de 25% e 50% da resistência à compressão perpendicular do paricá.

Após este tempo sobre pressão, esta foi zerada e o material mantido por mais 5 minutos, apenas em contato com os pratos aquecidos da prensa, caracterizando assim o pós-tratamento. Como ocorreu nos compensados, este estágio é importante para suceder o relaxamento das tensões de compressão, o que vai refletir na estabilidade dimensional do material. Posteriormente à retirada dos painéis da prensa, esperou-se o resfriamento para então levá-los à climatização e assim proceder com as medições.

Tabela 2. Tratamentos termomecânicos aplicados nos painéis LVL.

Tratamento	Temperatura	Pressão (MPa)	Tempo sob pressão (min.)	Tempo a pressão zero (min.)
Testemunha	150°C	1,00	20	5
1	150°C	1,47	20	5
2	150°C	2,94	20	5

Foram confeccionados três painéis para cada tratamento, que depois foram dispostos em câmara de climatização, com temperatura e umidade controladas, permanecendo nesta condição até atingirem massa constante.

2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas avaliadas nos LVLs foram: flexão estática paralela às fibras com obtenção do módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_m) na posição *flatwise* (ASTM D 5456, 2006), específica para painéis de lâminas paralelas e seguiram-se os procedimentos da norma para a realização da dureza Janka (f_H) (ASTM D 1037, 1999) e resistência ao cisalhamento na linha de cola ($f_{gv,0}$) (EN 314-1, 2004).

Realizou-se os ensaios de flexão estática com 9 amostras de cada um dos tratamentos, e também das testemunhas, com dimensões de 50 mm x 400 mm e espessura variando de acordo com o tratamento. Esse ensaio, como nos compensados, também objetivou caracterizar a rigidez e a resistência dos LVLs e serviu para avaliar se a

densificação resultou em ganhos significativos nessas propriedades. Os módulos de ruptura e de elasticidade foram obtidos conforme as Equações 1 e 2 respectivamente. A partir destas amostras foram retiradas aquelas destinadas à realização da dureza Janka, utilizando uma máquina de ensaios universal EMIC com capacidade de carga máxima de 300 kN.

$$f_M = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h^2} \quad \text{Equação 1}$$

$$E_M = \frac{P' \times L^3}{4 \times b \times h^3 \times \Delta} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

f_M = Módulo de ruptura em MPa;
 P = Máxima carga em N;
 L = Vão apoios em mm;
 b = Largura do corpo-de-prova em mm;
 h = Espessura do corpo-de-prova em mm;
 E_M = Módulo de elasticidade em MPa;
 P' = Carga no limite proporcional em N;
 Δ = Deformação da peça em mm.

Para fazer o ensaio de dureza Janka, os corpos-de-prova de 50 mm x 50 mm foram colados dois a dois para satisfazer a exigência mínima de 25 mm de espessura da norma (ASTM D 1037, 1999). Dessa forma, em cada tratamento foram feitas 8 repetições. Já para o ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo à linha de cola foram destinadas 6 amostras de cada tratamento, sendo a resistência determinada a partir da Equação 3.

$$f_{gv,0} = \frac{P_{máx}}{A} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$f_{gv,0}$ = Cisalhamento paralelo à linha de cola em MPa;
 $P_{máx}$ = Carga de Ruptura em N;
 A = Área em mm².

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

Foram realizados ensaios de absorção de água, inchamento na espessura (ASTM D 1037, 1999) e o teor de umidade em equilíbrio (TUE). Estes ensaios foram realizados em 10 amostras de cada tratamento, medindo 50 mm x 50 mm, que foram dispostas submersas em água à temperatura ambiente por período de 24 horas, onde nos períodos de 2 e 24 horas a massa e as dimensões foram mensuradas com balança de precisão e relógio comparador. Os valores referentes à absorção de água e inchamento em espessura foram avaliados em porcentagem da diferença entre a medição prévia e medição posterior à imersão em períodos de 2 e 24 horas conforme as Equações 4 e 5, respectivamente:

$$ABS \% = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

$$IE \% = \frac{E_f - E_i}{E_i} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

ABS = Absorção de água em %;

M_i = Massa Inicial, anterior à imersão em água em g;

M_f = Massa Final, posterior à imersão em água em g;

IE = Inchamento em espessura em %;

E_i = Espessura inicial, anterior à imersão em água em mm;

E_f = Espessura Final, posterior à imersão em água em mm.

A taxa de compressão (TC, %) representa o grau de densificação do material, relacionando a espessura final com a espessura inicial da amostra (Equação 6). Quanto maior é a TC maior é o grau de densificação do material, e ela foi medida após a climatização das amostras a 12% de umidade e manutenção da massa constante.

$$TC \% = \frac{E_i - E_f}{E_i} \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

TC = Taxa de compressão em %;

E_i e *E_f* = espessura inicial e espessura final, em mm.

Após o ensaio de inchamento e absorção, os corpos-de-prova foram secos em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ até alcançarem massa constante e então foi medida a TNRE - taxa de não retorno em espessura (Equação 7), que representa o inchamento causado pela liberação das tensões de compressão durante a prensagem. O TUE foi obtido nos mesmos corpos-de-prova, após a medição da TNRE, de acordo com a norma ASTM D 4442 (2001).

$$\text{TNRE \%} = \frac{E_f - E_i}{E_i} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

TNRE = Taxa de não retorno em espessura em %;

E_i = Espessura Inicial, posterior a 24 horas de imersão em água em mm;

E_f = Espessura Final, posterior climatização dos CP à 12% de umidade em mm.

Os valores de todas as propriedades analisadas foram utilizados para o cálculo da eficiência do tratamento (E_f) em melhorar determinada propriedade, conforme Rowell & Youngs (1981) e Del Menezzi (2004). Como E_f é a relação entre o valor da propriedade da testemunha e o valor do painel tratado, valores positivos indicam efeito benéfico do tratamento, enquanto valores negativos indicam efeito deletério (Equação 8).

$$E_f \% = \frac{P_{NT} - P_T}{P_{NT}} \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

E_f = Eficiência do tratamento em %;

P_{NT} = propriedade não tratada;

P_T = propriedade tratada.

2.4 ANÁLISE DOS DADOS

A análise estatística dos resultados foi realizada com o programa SPSS versão 18.0 para sistema operacional Windows, de acordo com o número de repetições e de tratamentos específicos para cada propriedade mecânica e física. Foi feita a análise de variância e quando constatada a variação significativa pelo teste F, o teste post-hoc de Dunnett a 5% de significância foi utilizado para comparar as médias das amostras tratadas com a média das amostras testemunha, par a par.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MASSA ESPECÍFICA E TAXA DE COMPRESSÃO DOS LVLs

A massa específica aparente (ME), que nas testemunhas foi de 0,41 g/cm³, variou significativamente após os tratamentos, ficando em torno de 0,46 g/cm³ (Tabela 3). O aumento da massa específica foi decorrente da redução da espessura dos painéis causada pelo aumento da pressão aplicada. No T1, com pressão de 1,47 MPa, a ME foi de 0,44 g/cm³ e no tratamento 2, a pressão de 2,94 MPa levou a uma ME de 0,48 g/cm³. Os resultados obtidos condizem com Zhang et al. (1994), que observaram a relação direta entre a massa específica e a pressão aplicada. Shukla e Kamdem (2007) verificaram um aumento na massa específica entre 6% e 13% de LVLs de espécies folhosas de baixa massa específica produzidos sob pressão de 1,38 MPa a temperaturas amenas e em diferentes tempos.

Tabela 3. Massa específica (ME) e taxa de compressão (TC) das testemunhas e das amostras de LVLs.

Tratamento	ME (g/cm ³)	TC (%)
Test. (150°C, 1 MPa, 20')	0,41 (9,37)	-
T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	0,44 (9,89)	11,21 (46,47)
T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	0,48 (8,57)	25,08 (15,63)
Média dos tratamentos	0,46	18,14

Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%).

A massa específica da madeira e de painéis de madeira é um dos mais importantes parâmetros físicos e normalmente é considerado um previsor das propriedades mecânicas. Em painéis, a massa específica é determinada pelo tipo e condições da espécie utilizada, forma do elemento ou partícula de madeira, tipo de adesivo aplicado e os parâmetros do processo de fabricação como a pressão, temperatura, tempo de aplicação da pressão, etc.

Como a densificação acontece pela redução do volume da madeira causada pela redução da sua espessura, a taxa de compressão (TC) é uma outra forma de quantificar a densificação do material. Parte da redução em espessura pode ter origem na fratura de paredes celulares mais frágeis, com efeito localizado e irreversível. Outra parte, que se efetiva pela compressão da estrutura celular como um todo, pode armazenar tensões que, se

liberadas, tendem a promover certa expansão na espessura dos painéis (*springback*) (MÜLLER, 2009).

Como esperado, quanto maior foi a pressão aplicada, maior foi a taxa de compressão. Zhang et al. (1994) chegaram à mesma conclusão ao analisar LVLs fabricados com espécies do gênero *Populus*. Os autores concluíram também que o teor de umidade das lâminas exerceu uma influência importante na taxa de compressão dos painéis.

3.2 TEMPERATURA X TEMPO

O tempo e a temperatura foram anotados quando a prensa fez ajustes para manter a pressão constante sobre os painéis de cada tratamento, exceto para as testemunhas (Tabela 1 do Apêndice 8). Nestas, a bomba baixa foi mantida desligada, portanto a prensa não realizou ajustes na pressão. Ainda assim, a temperatura foi anotada a cada 2 minutos.

O primeiro ajuste normalmente é atribuído ao acomodamento do painel na prensa. O segundo ajuste deu-se à 97°C, indicando que esta é a faixa da temperatura de transição vítrea para o teor de umidade da madeira no momento do tratamento. No tratamento 2, os quatro primeiros ajustes ocorreram em um tempo muito curto entre eles – menos de 10 segundos, e à uma temperatura relativamente baixa.

Estes ajustes ocorreram devido a natureza viscoelástica da madeira. Em baixas temperaturas, a madeira se comporta de forma resistente e até quebradiça (KUTNAR e KAMKE, 2010). Em altas temperaturas, a madeira apresenta um comportamento flexível e maleável. Entre essas duas condições ocorre a fase de transição, normalmente caracterizada pela temperatura de transição vítrea: a T_g (HORVATH et al., 2011). Temperaturas acima da T_g promovem mobilidade e permitem o rearranjo da estrutura molecular amorfa. Consequentemente, grandes deformações podem ocorrer sem fraturas na parede celular.

A compressão mecânica do tratamento aumentou a massa específica e consequentemente aumentou a condutividade térmica desses painéis, fazendo com que no tratamento 2 – onde a pressão foi maior – a evolução da temperatura tenha ocorrido de forma mais rápida. Kurowska et al. (2010) constataram que a condutividade térmica da madeira depende da espécie, massa específica, direção das fibras, teor de umidade e temperatura, sendo que o aumento na massa específica leva a um ganho proporcional na condutividade térmica da madeira.

Observa-se que a evolução da temperatura nos painéis testemunhas e no tratamento 1 transcorreu de forma semelhante, possivelmente devido à semelhança das pressões usadas

(Figura 1). Por outro lado, observa-se a curva de aquecimento do tratamento 2, que por ter sido aplicado maior pressão, apresentou um maior aumento de temperatura mesmo tendo iniciado a uma temperatura mais baixa. A temperatura na etapa final dos tratamentos 1 e 2 estava superior a 150°C, o que não ocorreu com a testemunha.

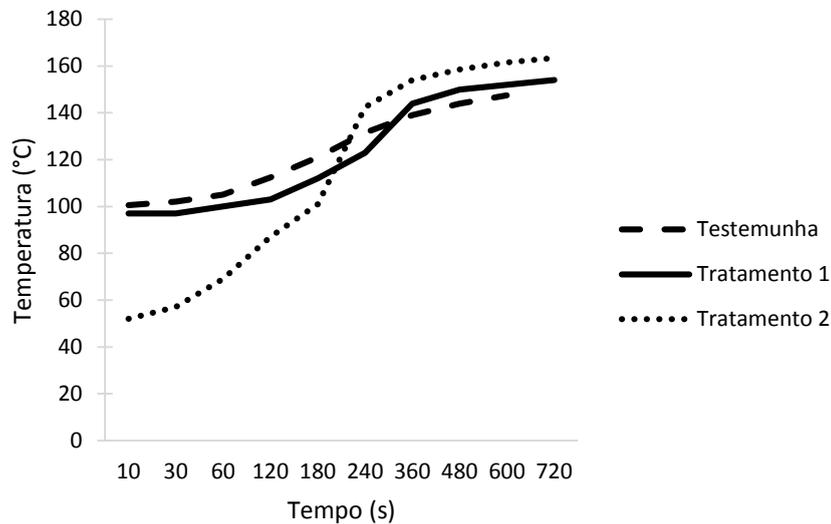


Figura 11. Evolução da temperatura no interior dos LVLs. Testemunha (150°C, 1 MPa, 20'); Tratamento 1 (150°C, 1,47MPa, 20'); Tratamento 2 (150°C, 2,94MPa, 20').

3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS LVLs

A análise estatística (Apêndice 5, Tabela 3), mostrou a existência de diferenças significativas entre as propriedades físicas avaliadas. A Tabela 4 apresenta a média e o coeficiente de variação para as propriedades físicas dos LVLs tratados e das testemunhas. É possível verificar que, de forma geral, o aumento da pressão aplicada levou a uma diminuição da estabilidade dimensional.

Tabela 4. Propriedades de estabilidade dimensional dos painéis LVLs.

Tratamento	Propriedades (%)					
	IE2h	IE24h	ABS2h	ABS24h	TUE	TNRE
Test. (150°C, 1 MPa, 20')	2,93 (42,0)	4,61 (35,0)	29,00 (18,0)	79,61 (8,0)	13,42 (4,0)	1,93 (10,0)
T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	7,24* (27,0)	10,38* (20,0)	37,02 (23,0)	91,04 (12,0)	13,45 (11,0)	4,00 (58,0)
T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	7,18* (44,0)	7,31* (30,0)	37,30* (19,0)	76,57 (15,0)	15,22* (6,0)	4,64 (86,0)

(*) na mesma coluna indicam valores estatisticamente diferentes da testemunha pelo teste Dunnett a 5% de significância. Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%). IE2h: Inchamento após 2h; IE24h: Inchamento após 24h; ABS2h: absorção de água após 2h; ABS24h: absorção de água após 24h; TUE: teor de umidade em equilíbrio; PM: perda de massa; TNRE: taxa de não retorno em espessura.

No inchamento em espessura após 2 horas de imersão, as amostras tratadas incharam em média duas vezes e meia o inchamento apresentado pelas testemunhas, e após 24 horas, o T2 havia inchado quase 60% a mais que as testemunhas, enquanto que o T1 haviam inchado 125% a mais. Era esperado um inchamento em espessura dos LVLs, devido à maior tensão de compressão, com resultados maiores quanto maior fosse a pressão aplicada no tratamento. Porém, nenhuma tendência foi observada em função do aumento da pressão.

Observa-se que absorção de água após 2 horas de imersão foi semelhante para T1 e T2, embora o teste Dunnett tenha considerado apenas o T2 diferente da testemunha. Na absorção após 24 horas, os tratamentos foram considerados estatisticamente iguais à testemunha. Melo (2012) obteve resultado semelhante ao trabalhar com LVL de paricá fabricado com lâminas de espessura equivalente a este trabalho, chegando ao valor médio de 22,58% de absorção após 2h. Müller (2009) obteve um valor de 22,68% na mesma propriedade ao analisar LVLs produzidos com lâminas de pinus. Shukla e Kamdem (2007), analisando LVLs feitos a partir de espécies folhosas de baixa massa específica, produzidos sob pressão de 1,38 MPa a temperaturas amenas e em diferentes tempos, encontraram valores semelhantes para esta propriedade, variando de 29% a 34%.

Na absorção após 24 horas, os valores atingidos foram muito altos, até mesmo para a testemunha; enquanto o T2 alcançou um resultado semelhante ao da testemunha - 76,57% e 79,61% respectivamente -, o T1 praticamente dobrou seu peso ao absorver 91,04% de água. Melo (2012) caracterizou as lâminas de paricá para a produção de LVLs e os resultados mostraram que as lâminas possuem baixa massa específica, elevada porosidade e conseqüentemente alta capacidade de absorção de água. Ele também observou que a

madeira de paricá tem elevado coeficiente anisotrópico ($T/R > 2$), indicando ser as lâminas avaliadas consideravelmente instáveis.

A estabilidade dimensional das lâminas também deve ser considerada no momento de manufatura dos painéis. Lâminas obtidas de lenhos de tração, compressão ou da região próxima à medula podem apresentar contrações e inchamentos elevados, comportamentos que podem ser repassados para os painéis (MELO, 2012). Todavia, isoladamente, esse aspecto não pode ser considerado limitante para seu uso, tendo em vista as inúmeras técnicas existentes que visam melhorar a estabilidade de madeiras e painéis de madeiras, como tratamentos termomecânicos, alteração química, laminação cruzada, preenchimento, revestimento, dentre outros, conforme citados por Del Menezzi (2004).

Os resultados obtidos por Melo (2012) podem explicar os elevados valores de absorção e inchamento do LVL de paricá. Assim como para as madeiras, painéis com menor massa específica tendem a absorver mais água por apresentarem menor quantidade de parede celular para um mesmo volume (SUCHSLAND, 2004).

Normalmente, lâminas externas de LVLs tratados apresentam uma tendência de terem menor permeabilidade. De acordo com Kollmann e Schneider (1963), citados por Kollmann et al. (1975), a utilização de altas temperaturas na secagem de lâminas e na prensagem a quente de painéis laminados reduz sua capacidade de sorção. Com base no que afirmam esses autores, é provável que o tempo de prensagem a quente seja fator influente no efeito de redução da sorção, bem como se torna claro que as lâminas de capa e contracapa são as mais suscetíveis ao referido efeito (ALMEIDA e JANKOWSKY, 2004). Isso pode ser interessante como meio de melhorar a estabilidade dimensional, o desempenho mecânico e a durabilidade de elementos estruturais LVL para uso exterior.

Além da massa específica de um painel e da permeabilidade característica da madeira que o constitui, vários outros fatores podem influir na capacidade de absorção d'água do painel. Segundo Bortoletto Júnior (2003), o uso de adesivo fenólico, que não é higroscópico após a cura, e de farinha de casca de coco, que possui a mesma característica, pode proporcionar linhas de cola (ou planos) que atuam como “barreiras” à penetração d'água nas camadas de lâminas internas, contribuindo para a redução da absorção d'água. Com base nesses argumentos, pressupõe-se, para painéis multilaminados colados com resina fenólica, uma menor absorção de água em relação à madeira maciça natural, o que representa uma vantagem para os elementos estruturais LVLs assim manufaturados.

O inchamento em espessura dos painéis de madeira é dado pela soma de dois fatores principais, um relacionado à natureza higroscópica da madeira, e outro à liberação de

tensões de compressão. Após a secagem, o inchamento higroscópico é recuperado, já o inchamento devido às tensões de compressão é definitivo e irreversível (DEL MENEZZI, 2004). Esse processo geralmente é acompanhado pela perda de resistência do painel, já que este, após a secagem apresenta um maior volume e uma massa semelhante àquela antes da exposição, o que acarretará uma redução da massa específica (LEE e WU, 2002).

A contribuição de cada tipo de inchamento (inchamento higroscópico e o inchamento devido a liberação da tensão de compressão) para o inchamento em espessura total é bastante variável, sendo que alguns fatores determinantes são: a espécie de madeira, os parâmetros de prensagem, o teor e o tipo de adesivos, a geometria de partículas (HALLIGAN, 1970), entre outros, como citado por Del Menezzi (2004).

A taxa de compressão, observada após a prensagem dos painéis, por si só não é suficiente como parâmetro para indicar um maior inchamento em espessura. O T2 apresentou maior TC que o T1 (25,08% contra 11,21%, como visto na Tabela 4), e mesmo assim, tendo sua relação de material lenhoso por volume aumentada em percentual maior, ele mostra menor inchamento em espessura após 24 horas de imersão (7,31%, como visto na Tabela 6).

Quanto ao teor de umidade em equilíbrio (TUE), os painéis LVL produzidos sob maior pressão (T2) diferiram estatisticamente daqueles produzidos sob menor pressão (T1) e das testemunhas. Os valores mostraram que a baixa pressão não exerceu praticamente nenhuma influência nesta propriedade. Conforme Silva et al. (2006) além dos fatores inerentes à própria madeira, os aspectos relacionados a manufatura dos painéis também influenciam no teor de umidade de equilíbrio dos painéis. Dentre estes, os autores mencionam o tipo e a quantidade de resina empregada, o tempo e a temperatura de prensagem. Os mesmos autores mencionam ainda que a umidade de equilíbrio para produtos reconstituídos de madeira geralmente é menor quando comparada à madeira maciça para uma mesma condição de temperatura e umidade.

Um material que tenha alta TNRE tem maior inchamento e maior expansão em espessura. Pode-se observar na Tabela 6 que tanto os valores da TNRE dos LVLs tratados a uma pressão menor (T1) como os tratados a uma pressão maior (T2) foram significativamente iguais à testemunha. A TNRE representa o inchamento provocado pela liberação das tensões, e apesar de estatisticamente iguais, nota-se a tendência de os LVLs tratados acumularem mais as tensões das lâminas. Em materiais colados, a liberação das tensões de compressão ocasiona a perda da qualidade da colagem e nesse sentido a qualidade do adesivo é importante para manter o painel colado e limitar a liberação das

tensões (MOHEBBY et al., 2009).

Valores mais elevados de TNRE também implicam em redução da massa específica do painel, pois a sua espessura, após o ensaio de inchamento e posterior secagem, é aumentada. Nota-se este comportamento no T2, cuja TNRE foi maior, e portanto, teve sua massa específica mais reduzida em comparação ao T1. Isso ocorre porque a massa dos painéis não é afetada no ensaio de inchamento, mas o volume ocupado por ela aumenta, reduzindo assim sua densidade. A Tabela 1 do Apêndice 9 apresenta os dados da massa específica após o tratamento e após o ensaio de inchamento e secagem em estufa dos LVLs. Como ocorreu com os compensados, isso acarreta em uma possível redução das propriedades de resistência, comprometendo o comportamento estrutural do painel. Além disso, a elevada porosidade das lâminas de paricá foi o principal fator para o inchamento em espessura dos painéis tratados, além da liberação das tensões de compressão. Espera-se que a qualidade da colagem tenha sido afetada também.

Todos os valores referentes à eficiência do tratamento foram negativos – exceto a absorção de 24h do tratamento 2 - indicando que os tratamentos não foram eficientes na melhoria da estabilidade dimensional dos painéis tratados (Tabela 5).

Tabela 5. Eficiência (%) do tratamento sobre as propriedades de estabilidade dimensional dos painéis LVLs.

Tratamentos	Propriedades					
	IE2h	IE24h	ABS2h	ABS24h	TUE	TNRE
T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	-147,10	-125,16	-27,66	-14,36	-0,22	-107,25
T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	-145,05	-58,57	-28,62	3,82	-13,41	-590,67

Pode-se observar que o aumento da pressão causou um efeito significativo em três propriedades físicas: no inchamento após 24 horas de imersão, que ficou 29,5% menor; a absorção após 24 horas de imersão, que reduziu em 16% e o teor de umidade, que aumentou cerca de 12% (Tabela 6). Kurt e Cil (2012) afirmaram que quanto maior a pressão aplicada na densificação de LVLs, menor se torna o lúmen das células, menor será sua porosidade e mais profunda será a penetração do adesivo; as linhas de cola acabam tornando-se barreiras que impedem uma maior absorção de água. Quanto ao aumento do teor de umidade, Unsal et al. (2011) afirmaram que aplicando-se mais pressão sem elevar a temperatura induz a uma maior recuperação da deformação, porém não há muitas mudanças termo-químicas ocorrendo nesta madeira que está sob maior pressão. Essas

mudanças termo-químicas são essenciais para que ocorra a redução do teor de umidade.

Tabela 6. Efeito da pressão sobre as propriedades físicas dos painéis LVLs.

Propriedade	Pressão (MPa)	
	1,47	2,94
IE2h	7,24 ^a	7,18 ^a
IE24h	10,38 ^a	7,31 ^b
Abs2h	37,02 ^a	37,30 ^a
Abs24h	91,04 ^a	76,57 ^b
TNRE	4,00 ^a	4,64 ^a
TUE	13,45 ^a	15,22 ^b

Letras iguais na mesma variável não diferem estatisticamente pela ANOVA a 95% de probabilidade.

3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A análise estatística (Apêndice 5, Tabela 4), não mostrou a existência de diferenças significativas entre as propriedades mecânicas avaliadas. Observa-se uma tendência em reduzir os valores médios das propriedades mecânicas dos painéis conforme aumenta a pressão aplicada (Tabela 7). Porém, de maneira inesperada, nenhum dos tratamentos diferiram estatisticamente das testemunhas pelo teste Dunnett, sendo possível apenas observar uma tendência que o efeito da pressão causou nas propriedades mecânicas analisadas.

Tabela 7. Valores das propriedades mecânicas dos painéis LVLs.

Tratamentos	Propriedades			
	f_M (MPa)	E_M (MPa)	f_H (N)	$f_{gv,0}$ (MPa)
Test. (150°C, 1,00 MPa, 20')	44,52 (19,0)	6118,34 (43,0)	1285,97 (13,0)	2,52 (19,0)
T1 (150°C, 1,47 MPa, 20')	43,59 (10,0)	4281,27 (14,0)	1412,92 (25,0)	1,99 (49,0)
T2 (150°C, 2,94 MPa, 20')	42,22 (14,0)	4191,86 (9,0)	1169,76 (7,0)	2,02 (7,0)

Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%). f_M : Módulo de ruptura; E_M : Módulo de elasticidade; f_H : Dureza Janka; $f_{gv,0}$: Cisalhamento na linha de cola.

Em relação ao módulo de ruptura (f_M), o aumento da pressão afetou levemente de maneira negativa na resistência do material, que foi de 44,52 MPa (testemunhas) até 43,59 MPa no tratamento 1, e 42,22 MPa no tratamento 2, representando uma redução de 2% e

5% respectivamente desta propriedade. No módulo de elasticidade (E_M) também foi observada esta tendência, uma vez que os valores de rigidez foram menores a medida em que se aumentava a pressão. Esta redução foi de 30% e 31,5% nos tratamentos 1 e 2, respectivamente.

Relembrando que os valores de f_M e E_M não sofreram um efeito do aumento da pressão estatisticamente significativo, e esta constatação confirma que, mesmo com a densificação elevando a massa específica do material, isto não confluía em diferenciação dos resultados.

A redução nos módulos de elasticidade e ruptura já foi retratado em alguns trabalhos (BEKHTA et al., 2009; McNATT 1974 citado por BRAUNS e ROCENS, 1997; SANDBERG et al., 2013). Shukla e Kamdem (2007) não observaram o efeito da duração da pressão no f_M e E_M de LVLs feitos de espécies do gênero *Populus*. Em contrapartida, Zhang et al. (1994) observaram uma relação direta entre a taxa de compressão e as propriedades mecânicas, sendo que aumentando a TC de 4% a 10% seria possível melhorar a resistência do LVL sem aumentar significativamente seu inchamento em espessura quando em contato com a umidade.

Melo (2012) encontrou valores médios de E_M de 8911 MPa e f_M de 51,26 MPa em LVLs produzidos com lâminas previamente classificadas de paricá, colados com adesivo FF e ensaiados em posição *flatwise*. O autor explica que em sistemas laminados horizontais (*flatwise*) submetidos à flexão, o posicionamento de lâminas de maior resistência próximo às superfícies torna-as mais eficientes, resultando em uma maior resistência do composto laminado.

Ainda faz-se notar para E_M e f_M menores coeficientes de variação apresentado pelos tratamentos em comparação à testemunha, que pode ser um indicador da boa aderência formada entre as lâminas de paricá depois do painel densificado. Como também observado por Müller (2009), a menor variância dos resultados obtidos aponta também para a possibilidade de uma distribuição mais equilibrada das tensões internas geradas, quando essa composição se encontra sob solicitação de flexão. Para os elementos LVLs assim manufaturados, essa suposta capacidade de estabelecer um equilíbrio mais estável para a interação de forças internas de reação, seria interessante para determinadas aplicações estruturais, devido à maior previsibilidade para a resistência desses elementos.

A dureza dos LVLs aumentou de 1285,97 N (testemunhas) para 1412,92 N com o T1 e reduziu para 1169,76 N após o T2. Este aumento atribui-se ao aumento da massa específica do material (UNSAI et al., 2011) e outros autores notaram este mesmo

comportamento trabalhando com compensados (ARRUDA, 2012; CANDAN et al., 2013; DOGU et al., 2010). Porém, notou-se que com o aumento da pressão (T2) em 50% da resistência à compressão do paricá houve uma tendência a diminuir o valor da dureza.

A análise da resistência dos painéis ao cisalhamento paralelo à linha de cola ($f_{gv,0}$) apontou como o aumento da pressão também não influenciou esta propriedade. A escolha do adesivo adequado é uma condição essencial para a boa qualidade da linha de cola, podendo refletir diretamente no desempenho dos painéis para a resistência ao cisalhamento paralelo. A exemplo disso, Shukla e Kamden (2008) utilizaram o adesivo PVAc para confeccionar LVLs produzidos com madeira de três espécies e, observaram valores de $f_{gv,0}$ variando de 1,8 a 2,5 MPa.

Os valores observados no presente estudo podem ser considerados baixos se comparados aos produzidos com diferentes espécies e colados com diversos tipos de resinas, mesmo que não tenham passado por nenhum tratamento termomecânico (KAMALA et al., 1999; RENZO, 2008; UYSAL, 2005; PIO, 2002; SOUZA, 2009). Como citado anteriormente, a resistência ao cisalhamento seja paralelo ou perpendicular à linha de cola, não depende apenas da qualidade do adesivo, mas também de características da própria madeira empregada na manufatura dos painéis. Deste modo, conforme observado por Gungor et al. (2006) e Shukla e Kamden (2008), mesmo com a utilização de adesivos estruturais – neste trabalho, o FF - a obtenção de baixos valores de resistência pode ocorrer.

Por ser o paricá uma espécie de baixa massa específica, principalmente em se tratando de indivíduos abatidos jovens (4 a 7 anos), as amostras de madeira desta espécie apresentaram baixos valores de resistência aos esforços cisalhantes (MELO, 2012). Segundo Serpa et al. (2003) para obtenção de madeira mais resistente dentro de uma população é necessário realizar a colheita das árvores mais velhas, pois estas tendem a possuir uma porcentagem maior de madeira adulta, e conseqüentemente, apresentarem geralmente uma maior massa específica.

A variação de comportamento das propriedades mecânicas dos LVLs refletiu em variação da eficiência do tratamento (Tabela 8). Mesmo que os tratamentos termomecânicos analisados não tenham afetado as propriedades significativamente, nota-se que o comportamento delas é muito distinto, sendo evidente que algumas foram menos influenciadas pelo tratamento, tal como f_M (-2,09%), enquanto outras são mais sensíveis, como o E_M (-30,03%).

Tabela 8. Eficiência (%) do tratamento sobre as propriedades mecânicas dos painéis LVLs.

Tratamentos	Propriedades			
	f_M	E_M	f_H	$f_{gv,0}$
T1 (120°C, 7', 15')	-2,09	-30,03	9,87	-20,94
T2 (120°C, 7', 30')	-5,17	-31,49	-9,04	-20,03

Para Zhang et al. (1994), existe uma diferença no critério adotado para definir a pressão aplicada em compensados e em LVLs; o motivo que leva à redução da pressão aplicada na fabricação de compensados é principalmente a otimização do volume de produção (MCDONALD, 1951 citado por ZHANG et al., 1994). Em relação ao LVL, os fabricantes têm a preocupação em manter as propriedades mecânicas em um nível apropriado, uma vez que este produto é utilizado primordialmente em aplicações estruturais de engenharia. Já que a densificação de um material geralmente leva a uma melhora nas propriedades mecânicas, uma maior pressão é necessária ao LVL para este se manter competitivo com outros produtos estruturais alternativos. Porém, uma consequência indesejável da densificação é o potencial para a absorção de umidade e o inchamento em espessura do material, tanto aquele que está armazenado como aquele em serviço. Para estes autores a chave é encontrar um equilíbrio entre as propriedades mecânicas em um nível aceitável e um inchamento em espessura admissível.

Com relação ao efeito das pressões adotadas sobre a resistência dos painéis, pode-se observar que o aumento da pressão não afetou significativamente nenhuma das propriedades mecânicas analisadas (Tabela 9). Ainda assim, nota-se uma clara tendência à diminuição das mesmas quando se eleva a pressão do tratamento, exceto para o cisalhamento na linha de cola

Tabela 9. Efeito da pressão sobre as propriedades mecânicas dos painéis LVLs.

Propriedade	Pressão (MPa)	
	1,47	2,94
f_M	43,59 ^a	42,22 ^a
E_m	4281,27 ^a	4191,86 ^a
f_H	1412,92 ^a	1169,76 ^a
$f_{gv,0}$	1,99 ^a	2,02 ^a

Letras iguais na mesma variável não diferem estatisticamente pela ANOVA a 95% de probabilidade.

4. CONCLUSÕES

- A densificação durante o processo de prensagem não causou nenhum efeito positivo sobre as propriedades mecânicas, independentemente da pressão utilizada.
- Ainda, os LVLs produzidos da forma proposta tornaram-se instáveis dimensionalmente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

CONCLUSÕES GERAIS

- A estratégia de densificação adotada para o compensado trouxe uma melhoria substancial nas propriedades mecânicas módulo de ruptura e dureza deste material, os tornando tão ou mais resistentes quanto os não tratados;
- Quanto aos LVLs, a estratégia de densificação adotada não afetou as propriedades mecânicas;
- Para ambas as estratégias abordadas neste trabalho, houve redução na estabilidade dimensional. Não foi possível reduzir o efeito do *springback* nem mesmo com os pós-tratamentos aplicados nos compensados.

RECOMENDAÇÕES

Visando o aprofundamento do tema, recomenda-se avaliar adicionalmente os seguintes parâmetros:

- Investigar a aplicação do tratamento termomecânico concomitantemente à prensagem do compensado, no momento da sua manufatura;
- Investigar o efeito da aplicação de outros níveis de temperatura, tempo e pressão no tratamento termomecânico, concomitantemente à prensagem do painel LVL, no momento da sua manufatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. R.; JANKOWSKY, I. P. Produção de lâminas a partir da madeira de clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis*, v. 65, p. 49-58, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods of evaluating properties of wood-based fiber and particle panel materials. ASTM D 1037 Annual book of ASTM standards, v. 15.03. ASTM, West Conshohocken, PA. 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. ASTM D 4442 Annual Book of ASTM Standards, v. 04.09. ASTM, West Conshohocken, PA. 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard specification for evaluation of structural composite lumber products. ASTM D 5456. Annual book of ASTM standards. ASTM, West Conshohocken, PA. 2006.

AVRAMIDIS, S.; SMITH, L.A. The effect of resin content and face-to-core ratio on some properties of oriented strand board. *Holzforschung*, Berlim, v. 43, n. 2, p. 131- 133, 1989.

BEKHTA P.A. et al. Properties of plywood manufactured from compressed veneer as building material. *Mater Des*, v.30, p.947–953, 2009.

BLOMBERG, J. et al. Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. *Wood Science Technology*, v.39, p.339-350, 2005.

BORTOLETTO JUNIOR, G. Produção de Compensados com 11 Espécies do Gênero *Eucalyptus*, Avaliação das suas Propriedades Físico-Mecânicas e Indicações para Utilização. *Scientia Forestalis*, n. 63, p. 65-78, 2003.

BRAUNS, J.; ROCENS, K. Hygromechanical behaviour of wooden composites. *Wood Science and Technology*, v.31, p.193-204, 1997.

CANDAN, Z.; KORKUT, S.; UNSAL, O. Effect of thermal modification by hot pressing on performance properties of paulownia wood boards. *Industrial Crops and Products*, v.45, p. 461–464, fev. 2013.

CARVALHO, A.M. et al. Use of Brazilian eucalyptus to produce LVL panels. *Forest Products Journal*, v.54, n.11, p.61-64, 2004.

DEL MENEZZI, C. H. S. Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB). Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, 2004.

DOGU, D. et al. Anatomical investigation of thermally compressed wood panels. *BioResources*, v. 5, n. 4, p. 2640–2663, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Plywood: bonding quality. Part 1: Test methods. Brussels, 2004.

GUNGOR, N. M.; AYRILMIS, N.; KANTAY, R. Selected physical and mechanical properties of LVL made from *Pterocarya fraxinifolia* (Clam) Spach. *Forest Products Journal*, v.56, n.5, p. 82-85, 2006.

HALLIGAN, A.F. A review of thickness swelling in particleboard. *Wood Science and Technology*, Berlin, v. 4, n. 3, p. 301-312, 1970.

HASHIM, R.; HOW, L.S.; OTHMAN, S.; YAMAMOTO, K. Effect of extractive removal on dimensional stability and bonding properties of particleboard made from hybrid of *Acacia*. *Journal of the Institute of Wood Science*, Buckinghamshire, v. 15, n. 5, p. 261-266. 2001.

HAYGREEN, J.G; BOWYER, J.L. Forest products and wood science: An introduction. Iowa State University Press: Ames, 3 ed, 1996. 484p.

HORVATH, B. et al. Thermal softening of transgenic aspen. *BioResources*, v. 6, n. 2, p. 2125–2134, 2011.

IWAKIRI, S. et al. Produção de compensados de *Pinus taeda* L. e *Pinus oocarpa* Schiede com diferentes formulações de adesivo uréia formaldeído. *Revista Árvore*, v.26, n.3, p.371-375, 2002.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis laminados unidirecionais - LVL - com lâminas de *Schizolobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. *Cerne*, v. 16, n.4, p. 557-563, 2010.

KAMALA, B.S.; KUMAN, P.; RAO, R.V.; SHARMAN, S.N. Performance test of laminated veneer lumber (LVL) from rubber wood for different physical and mechanical properties. *Holz als Roh und Werkstoff*, v.57, p.144-116, 1999.

KELLY, M.W. A critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboards. Madison: USDA-FPL, 1977. 66p. (General Technical Report FPL, n.10).

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. Principles of wood science and technology II: wood based materials. New York: Spring; Berlin: Verlag, 1975. 703 p.

KOLLMANN F.; SCHNEIDER, A. On the sorption behaviour of heat stabilized wood. *Holz Roh-Werkst*, v.21, n.3, p.77-85, 1963.

KUROWSKA, A. et al. Veneer Densification as a Tool for Shortening of Plywood Pressing Time. *Drvna Industrija*, v. 61, n. 3, p. 193–196, 2010.

KURT, R.; CIL, M. Effects of press pressures on glue line thickness and properties of laminated veneer lumber glued with phenol formaldehyde adhesive. *BioResources*, v.7, n.4, p. 5346-5354, 2012.

KUTNAR, A.; KAMKE, F. A. Compression of wood under saturated steam, superheated steam, and transient conditions at 150°C, 160°C, and 170°C. *Wood Science and*

Technology, v. 46, n. 1-3, p. 73–88, 8 out. 2010.

LEE, J.N.; WU, Q. In-plane dimensional stability of three-layer oriented strandboard. *Wood and Fiber Science*, Madison, v. 34, n. 1, p. 77-95. 2002.

MARRA, A. A. *Technology of wood bonding*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 453p.

MATOS, J. L. M. Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997. 117 f.

MACDONALD, M. D. Compression of Douglas fir veneer during pressing. *The Timberman*, v.52, n.4, p. 98-102, 1951.

MCKEEVER, D. B. Engineered wood products: a response to the changing timber resource. *Pacific Rim Wood Market Report*, n.123, p.5-15. 1997.

MCNATT J. D. Effects of equilibrium moisture content changes on hardboard properties. *Journal of Forest Products*, v.24, n.2, p.29-35, 1974.

MELO, R.R. Avaliação de variáveis tecnológicas na produção de painéis LVL confeccionados com paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012. 164p.

MENDES, L.M. *Pinus* spp. na produção de painéis de partículas orientadas. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2001. 156 f.

MOHEBBY, B. et al. Springback in Acetylated Wood Based Composites. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 9, p.3103-3106, 2009.

MÜLLER, M.T. Influência de diferentes combinações de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em painéis estruturais LVL. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009. 164f.

PEASE, D. A. Panels: products, applications and production trends: A Special Report. *Wood Technology*: Miller Freeman, 1994. 254p.

PIO, N. S. Produção de painéis estruturais de lâminas paralelas (LVL) de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2002. 168 f.

RENZO, R. Painel estrutural de laminas paralelas (LVL) de *Eucalyptus grandis* utilizando adesivo resorcinólico, taninos e poliuretano derivado de óleo de mamona. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008. 115f.

ROWELL, R. M.; YOUNGS, R. L. Dimensional Stabilization of Wood in Use. *Forest*

Products Laboratory. Madison, WI, 8pp. 1981.

SANDBERG, D.; HALLER, P.; NAVI, P. Thermo-hydro and thermo-hydro- mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Material Science and Engineering*, v. 8, n. 1, p. 64–88, mar. 2013.

SERPA, P.N. et al. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. *Revista Árvore*, v.27, n.5, p.723-733, 2003.

SHUKLA, S.R.; KAMDEM, D.P. Properties of laminated veneer lumber (LVL) made with low density hardwood species: effect of the pressure duration. *Holz Roh Werkst*, v.66, p.119–127, 2008.

SILVA, G.A. et al. Estimativa de umidade de equilíbrio de painéis de madeira. *Scientia Forestalis*, n.70, p.23-29, 2006.

SKYBA, O. Durability and Physical Properties of Thermo-Hygro-Mechanically (THM) densified Wood. Tese (Doutorado). Ucrânia, 2008. 167p.

SMULSKY, S. (editor chefe). Engineered Wood Products: a guide for specifiers, designers and users. *Forest Products Society*, FPS Research Foundation, Madison, 1997.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. Fatos e números do Brasil Florestal 2006. São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br>>. Acesso em: março de 2015.

SOUZA, F. Propriedades mecânicas, físicas, biológicas e avaliação não- destrutiva de painéis de lâminas paralelas confeccionados com madeira de *Pinus oocarpa* e *P. kesiya*. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 135p, 2009.

SUCHSLAND, O. The swelling and shrinking of wood. Madison: Forest Products Society, 2004. 189p.

TAMMELA, K. 1998. Laminated veneer lumber (LVL) manufacturing. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1, Belo Horizonte. Anais. Viçosa, SIF/UFV/DEF: p. 162-168.

UNSAL, O. et al. Effect of Thermal Compression Treatment on the Surface Hardness, Vertical Density Profile and Thickness Swelling of Eucalyptus Wood Boards by Hot-pressing. *Mokchae Konghak*, v. 39, n. 2, p. 148–155, 2011.

UYSAL, B. Bonding strength and dimensional stability of laminated veneer lumbers manufactured by using different adhesives after the steam test. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v.25, n.5, p.395-403, 2005.

ZHANG, H.J.; CHUI, Y.H.; SCHNEIDER, M.H. Compression control and its significance in the manufacture and effects on properties of poplar LVL. *Wood Science and Technology*, v.28, p.285-290, 1994.

APÊNDICE 1 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES
AVALIADAS DOS COMPENSADOS DE ACORDO COM O TRATAMENTO

Tabela 1. Estatística descritiva para as propriedades físicas dos compensados de 12 mm.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
IE2h	Testemunha	3,53	0,48	10
	T1 (120°C, 7', 15')	30,82	2,37	10
	T2 (120°C, 7', 30')	29,19	3,22	10
	T3 (120°C, 12', 15')	33,59	3,09	10
	T4 (120°C, 12', 30')	35,29	2,80	10
	T5 (150°C, 7', 15')	14,12	5,81	10
	T6 (150°C, 7', 30')	20,17	3,07	10
	T7 (150°C, 12', 15')	28,45	3,01	10
	T8 (150°C, 12', 30')	26,46	5,45	10
IE24h	Testemunha	6,90	0,83	10
	T1 (120°C, 7', 15')	36,73	2,29	10
	T2 (120°C, 7', 30')	34,59	2,47	10
	T3 (120°C, 12', 15')	41,14	2,24	10
	T4 (120°C, 12', 30')	41,18	3,01	10
	T5 (150°C, 7', 15')	23,15	3,50	10
	T6 (150°C, 7', 30')	27,29	3,43	10
	T7 (150°C, 12', 15')	37,09	3,22	10
	T8 (150°C, 12', 30')	35,99	6,44	10
ABS2h	Testemunha	25,35	2,25	10
	T1 (120°C, 7', 15')	50,06	4,29	10
	T2 (120°C, 7', 30')	51,62	8,61	10
	T3 (120°C, 12', 15')	51,99	6,35	10
	T4 (120°C, 12', 30')	51,50	3,70	10
	T5 (150°C, 7', 15')	34,80	3,54	10
	T6 (150°C, 7', 30')	40,72	4,94	10
	T7 (150°C, 12', 15')	42,02	3,72	10
	T8 (150°C, 12', 30')	38,28	7,27	10
ABS24h	Testemunha	55,65	2,90	10
	T1 (120°C, 7', 15')	74,80	3,31	10
	T2 (120°C, 7', 30')	76,33	7,13	10
	T3 (120°C, 12', 15')	82,20	5,75	10
	T4 (120°C, 12', 30')	76,89	5,94	10
	T5 (150°C, 7', 15')	62,32	5,30	10
	T6 (150°C, 7', 30')	68,26	5,38	10
	T7 (150°C, 12', 15')	68,25	4,19	10
	T8 (150°C, 12', 30')	69,21	8,73	10
TNRE	Testemunha	5,53	0,21	10
	T1 (120°C, 7', 15')	4,58	0,57	10
	T2 (120°C, 7', 30')	4,28	0,42	10
	T3 (120°C, 12', 15')	4,96	0,49	10
	T4 (120°C, 12', 30')	4,95	0,54	10
	T5 (150°C, 7', 15')	8,60	0,93	10
	T6 (150°C, 7', 30')	10,27	0,80	10
	T7 (150°C, 12', 15')	8,81	1,09	10
	T8 (150°C, 12', 30')	10,29	1,01	10

CONTINUA

Tabela 1. Estatística descritiva para as propriedades físicas dos compensados de 12 mm.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
TUE	Testemunha	13,37	0,34	10
	T1 (120°C, 7', 15')	12,87	0,11	10
	T2 (120°C, 7', 30')	12,90	0,11	10
	T3 (120°C, 12', 15')	12,75	0,15	10
	T4 (120°C, 12', 30')	12,92	0,21	10
	T5 (150°C, 7', 15')	12,81	4,11	10
	T6 (150°C, 7', 30')	12,34	0,19	10
	T7 (150°C, 12', 15')	12,59	9,53	10
	T8 (150°C, 12', 30')	12,35	0,24	10
PM	Testemunha	-	-	-
	T1 (120°C, 7', 15')	4,41	0,13	4
	T2 (120°C, 7', 30')	4,64	0,05	4
	T3 (120°C, 12', 15')	4,77	0,22	4
	T4 (120°C, 12', 30')	4,90	0,19	4
	T5 (150°C, 7', 15')	6,52	0,25	4
	T6 (150°C, 7', 30')	6,96	0,69	4
	T7 (150°C, 12', 15')	6,96	0,19	4
	T8 (150°C, 12', 30')	7,26	0,36	4

Tabela 2. Estatística descritiva para as propriedades mecânicas dos compensados de 12 mm.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
f_M	Testemunha	27,63	4,71	10
	T1 (120°C, 7', 15')	50,37	31,82	5
	T2 (120°C, 7', 30')	43,55	74,30	5
	T3 (120°C, 12', 15')	44,63	74,75	5
	T4 (120°C, 12', 30')	40,69	73,82	5
	T5 (150°C, 7', 15')	38,42	39,97	5
	T6 (150°C, 7', 30')	31,76	34,25	5
	T7 (150°C, 12', 15')	45,05	82,80	5
	T8 (150°C, 12', 30')	53,87	82,42	5
E_M	Testemunha	3316,18	819,01	10
	T1 (120°C, 7', 15')	4112,0	795,22	5
	T2 (120°C, 7', 30')	3585,9	1279,44	5
	T3 (120°C, 12', 15')	3235,7	836,34	5
	T4 (120°C, 12', 30')	2990,9	810,13	5
	T5 (150°C, 7', 15')	3407,6	816,79	5
	T6 (150°C, 7', 30')	2722,2	372,23	5
	T7 (150°C, 12', 15')	3507,7	875,45	5
	T8 (150°C, 12', 30')	4139,4	950,05	5
f_H	Testemunha	2042,7	41,74	10
	T1 (120°C, 7', 15')	2998,8	524,49	5
	T2 (120°C, 7', 30')	2190,6	104,17	5
	T3 (120°C, 12', 15')	2961,9	198,97	5
	T4 (120°C, 12', 30')	3141,8	334,80	5
	T5 (150°C, 7', 15')	1997,2	312,75	5
	T6 (150°C, 7', 30')	1856,8	289,96	5
	T7 (150°C, 12', 15')	2505,3	110,79	5
	T8 (150°C, 12', 30')	2616,5	235,28	5
$f_{gv,0}$	Testemunha	2,07	0,40	10
	T1 (120°C, 7', 15')	1,97	0,32	5
	T2 (120°C, 7', 30')	1,86	0,28	5
	T3 (120°C, 12', 15')	1,67	0,25	5
	T4 (120°C, 12', 30')	2,03	0,22	5
	T5 (150°C, 7', 15')	1,19	0,58	5
	T6 (150°C, 7', 30')	1,83	0,26	5
	T7 (150°C, 12', 15')	1,22	0,21	5
	T8 (150°C, 12', 30')	1,46	0,26	5

Tabela 3. Estatística descritiva para as propriedades físicas dos compensados de 20 mm.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
IE2h	Testemunha	2,19	0,21	12
	T1 (120°C, 7', 15')	16,62	2,72	12
	T2 (150°C, 7', 30')	20,32	7,51	12
IE24h	Testemunha	3,17	0,22	12
	T1 (120°C, 7', 15')	22,85	2,61	12
	T2 (150°C, 7', 30')	27,50	7,99	12
ABS2h	Testemunha	30,29	3,83	12
	T1 (120°C, 7', 15')	38,21	4,89	12
	T2 (150°C, 7', 30')	38,54	7,85	12
ABS24h	Testemunha	59,58	4,41	12
	T1 (120°C, 7', 15')	67,67	3,71	12
	T2 (150°C, 7', 30')	70,52	7,15	12
TNRE	Testemunha	2,41	0,10	12
	T1 (120°C, 7', 15')	8,84	0,81	12
	T2 (150°C, 7', 30')	10,58	0,58	12
TUE	Testemunha	11,02	0,17	12
	T1 (120°C, 7', 15')	10,46	0,16	12
	T2 (150°C, 7', 30')	9,61	0,24	12
PM	Testemunha	-	-	-
	T1 (120°C, 7', 15')	6,63	5,96	12
	T2 (150°C, 7', 30')	9,99	6,75	12

Tabela 4. Estatística descritiva para as propriedades mecânicas dos compensados de 20 mm.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
f_M	Testemunha	26,50	1,50	9
	T1 (120°C, 7', 15')	33,80	6,87	9
	T2 (120°C, 7', 30')	40,23	6,09	9
E_M	Testemunha	3161,41	368,30	9
	T1 (120°C, 7', 15')	4443,49	1821,07	9
	T2 (120°C, 7', 30')	5066,77	1914,14	9
f_H	Testemunha	1639,17	301,47	12
	T1 (120°C, 7', 15')	1954,10	288,96	12
	T2 (120°C, 7', 30')	2126,12	324,37	12
$f_{gv,0}$	Testemunha	0,79	0,12	6
	T1 (120°C, 7', 15')	1,35	0,37	6
	T2 (120°C, 7', 30')	1,05	0,40	6

APÊNDICE 2 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS COMPENSADOS
TRATADOS COM AS PROPRIEDADES DA TESTEMUNHA

Tabela 1. Análise de variância para as propriedades físicas dos compensados de 12 mm.

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
Tratamento	IE2h	8070,049	8	1008,756	94,502	0,000
	IE24h	9705,535	8	1213,192	96,370	0,000
	ABS2h	6952,875	8	869,109	27,584	0,000
	ABS24h	5399,198	8	674,900	18,887	0,000
	TNRE	510,481	8	63,810	107,870	0,000
	TUE	8,084	8	1,011	0,076	1,000
	PM	41,968	7	5,995	44,674	0,000
Erro	IE2h	853,958	80	10,674		
	IE24h	1019,702	81	12,589		
	ABS2h	2552,129	81	31,508		
	ABS24h	2894,367	81	35,733		
	TNRE	47,915	81	0,592		
	TUE	1080,780	81	13,343		
	PM	3,221	24	0,134		
Total	IE2h	8924,006	88			
	IE24h	10725,237	89			
	ABS2h	9505,004	89			
	ABS24h	8293,565	89			
	TNRE	558,396	89			
	TUE	1088,864	89			
	PM	45,189	31			

Tabela 2. Análise de variância para as propriedades mecânicas dos compensados de 12 mm.

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
Tratamento	f_M	3675,943	8	459,493	10,139	0,000
	E_M	9115327,9	8	1139416	1,274	,284
	f_H	$1,014 \times 10^7$	8	1267900,6	10,175	0,000
	$f_{gv,0}$	4,575	8	0,572	4,142	,001
Erro	f_M	1858,132	41	45,320		
	E_M	$3,667 \times 10^7$	41	894478,7		
	f_H	5109132,7	41	124613		
	$f_{gv,0}$	5,660	41	0,138		
Total	f_M	5534,075	49			
	E_M	$4,579 \times 10^7$	49			
	f_H	$1,525 \times 10^7$	49			
	$f_{gv,0}$	10,235	49			

Tabela 3. Análise de variância para as propriedades físicas dos compensados de 20 mm.

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
Tratamento	IE2h	2202,702	2	1101,351	47,416	0,000
	IE24h	3462,825	2	1731,413	125,137	0,000
	ABS2h	603,826	2	301,913	8,756	0,001
	ABS24h	580,178	2	290,089	14,371	0,000
	TNRE	417,347	2	208,674	640,935	0,000
	TUE	12,046	2	6,023	148,465	0,000
	PM	28,122	1	28,122	0,636	,434
Erro	IE2h	766,511	33	23,228		
	IE24h	428,919	31	13,836		
	ABS2h	1103,377	32	34,481		
	ABS24h	625,743	31	20,185		
	TNRE	9,767	30	0,326		
	TUE	1,339	33	0,041		
	PM	973,252	22	44,239		
Total	IE2h	2969,212	35			
	IE24h	3891,744	33			
	ABS2h	1707,203	34			
	ABS24h	1205,921	33			
	TNRE	427,115	32			
	TUE	13,385	35			
	PM	1001,374	23			

Tabela 4. Análise de variância para as propriedades mecânicas dos compensados de 20 mm.

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
Tratamento	f_M	694,350	2	347,175	25,286	0,000
	E_M	1,699x107	2	8493948,4	3,183	0,059
	f_H	1632977,2	2	816488,6	7,938	0,002
	$f_{gv,0}$	1,144	2	,572	2,962	0,074
Erro	f_M	302,053	22	13,730		
	E_M	6,404x107	24	2668452,2		
	f_H	3188423,4	31	102852,4		
	$f_{gv,0}$	4,054	21	,193		
Total	f_M	996,403	24			
	E_M	8,103x107	26			
	f_H	4821400,6	33			
	$f_{gv,0}$	5,198	23			

APÊNDICE 3 - ANÁLISE FATORIAL DO EFEITO DA TEMPERATURA, DO TEMPO
SOB PRESSÃO E TEMPO À PRESSÃO ZERADA SOBRE AS PROPRIEDADES DOS
COMPENSADOS DE 12 MM TRATADOS

Tabela 1. Análise de variância do efeito da temperatura, do tempo sob pressão e do tempo à pressão zerada nas propriedades físicas dos compensados de 12 mm.

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
Temperatura (T)	ABS2h	1489,062	1	1489,062	34,153	,000
	ABS24h	1010,028	1	1010,028	19,835	,000
	IE2h	759,384	1	759,384	58,817	,000
	IE24h	470,222	1	470,222	30,308	,000
	TNRE	156,751	1	156,751	179,712	,000
	PM	39,002	1	39,002	279,558	,000
	TUE	2,154	1	2,154	0,118	0,734
Tempo sob pressão (TeP)	ABS2h	15,774	1	15,774	0,362	0,553
	ABS24h	145,375	1	145,375	2,855	0,105
	IE2h	452,543	1	452,543	35,051	0,000
	IE24h	728,016	1	728,016	46,924	0,000
	TNRE	0,800	1	0,800	0,917	0,348
	PM	0,837	1	0,837	6,002	0,022
	TUE	18,890	1	18,890	1,038	0,319
Tempo à pressão zero (TePz)	ABS2h	15,967	1	15,967	0,366	0,551
	ABS24h	62,640	1	62,640	1,230	0,279
	IE2h	14,310	1	14,310	1,108	0,303
	IE24h	25,154	1	25,154	1,621	0,216
	TNRE	1,186	1	1,186	1,360	0,255
	PM	0,545	1	0,545	3,908	0,060
	TUE	0,024	1	0,024	0,001	0,971

CONTINUA

Tabela 1. Análise de variância do efeito da temperatura, do tempo sob pressão e do tempo à pressão zerada nas propriedades físicas dos compensados de 12 mm.

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
T x TeP	ABS2h	1489,062	1	1489,062	34,153	0,000
	ABS24h	1010,028	1	1010,028	19,835	0,000
	IE2h	759,384	1	759,384	58,817	0,000
	IE24h	470,222	1	470,222	30,308	0,000
	TNRE	156,751	1	156,751	179,712	0,000
	PM	39,002	1	39,002	279,558	0,000
	TUE	2,154	1	2,154	0,118	0,734
T x TePz	ABS2h	15,774	1	15,774	0,362	0,553
	ABS24h	145,375	1	145,375	2,855	0,105
	IE2h	452,543	1	452,543	35,051	0,000
	IE24h	728,016	1	728,016	46,924	0,000
	TNRE	0,800	1	0,800	0,917	0,348
	PM	0,837	1	0,837	6,002	0,022
	TUE	18,890	1	18,890	1,038	0,319
TePxTePz	ABS2h	15,967	1	15,967	0,366	0,551
	ABS24h	62,640	1	62,640	1,230	0,279
	IE2h	14,310	1	14,310	1,108	0,303
	IE24h	25,154	1	25,154	1,621	0,216
	TNRE	1,186	1	1,186	1,360	0,255
	PM	0,545	1	0,545	3,908	0,060
	TUE	0,024	1	0,024	0,001	0,971

CONTINUA

Tabela 1. Análise de variância do efeito da temperatura, do tempo sob pressão e do tempo à pressão zerada nas propriedades físicas dos compensados de 12 mm.

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
TxTePxTePz	ABS2h	0,904	1	0,904	0,021	0,887
	ABS24h	41,540	1	41,540	0,816	0,376
	IE2h	9,420	1	9,420	0,730	0,402
	IE24h	2,171	1	2,171	0,140	0,712
	TNRE	0,660	1	0,660	0,756	0,393
	PM	0,000	1	0,000	0,001	0,972
	TUE	16,417	1	16,417	0,902	0,352
Erro	ABS2h	1002,801	23	43,600		
	ABS24h	1171,189	23	50,921		
	IE2h	296,953	23	12,911		
	IE24h	356,844	23	15,515		
	TNRE	20,061	23	0,872		
	PM	3,209	23	0,140		
	TUE	418,603	23	18,200		
Total	ABS2h	69822,250	31			
	ABS24h	171184,8	31			
	IE2h	26943,343	31			
	IE24h	41327,057	31			
	TNRE	1656,782	31			
	PM	1081,368	31			
	TUE	5502,050	31			

Tabela 2. Análise de variância do efeito da temperatura, do tempo sob pressão e do tempo à pressão zerada nas propriedades mecânicas dos compensados de 12 mm.

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
Temperatura (T)	f_M	64,313	1	64,313	1,257	0,270
	E_M	13599,460	1	13599,460	0,014	0,906
	f_H	3356249,9	1	3356249,9	31,260	0,000
	$f_{gv,0}$	2,740	1	2,740	21,713	0,000
Tempo sob pressão (TeP)	f_M	253,580	1	253,580	4,958	0,033
	E_M	1287,095	1	1287,095	0,001	0,971
	f_H	2976308	1	2976308	27,721	0,000
	$f_{gv,0}$	0,021	1	0,021	0,169	0,684
Tempo à pressão zero (TePz)	f_M	46,253	1	46,253	0,904	0,349
	E_M	421019,6	1	421019,6	0,439	0,512
	f_H	270142,1	1	270142,1	2,516	0,123
	$f_{gv,0}$	0,276	1	0,276	2,184	0,149
T x TeP	f_M	871,724	1	871,724	17,044	0,000
	E_M	5591954,5	1	5591954,5	5,827	0,022
	f_H	78134,992	1	78134,992	0,728	0,400
	$f_{gv,0}$	0,655	1	0,655	5,190	0,030
T x TePz	f_M	104,401	1	104,401	2,041	0,163
	E_M	318240,6	1	318240,6	0,332	0,569
	f_H	224303	1	224303	2,089	0,158
	$f_{gv,0}$	0,552	1	0,552	4,372	0,045
TePxTePz	f_M	210,879	1	210,879	4,123	0,051
	E_M	1602884	1	1602884	1,670	0,205
	f_H	960383,2	1	960383,2	8,945	0,005
	$f_{gv,0}$	0,171	1	0,171	1,359	0,252

CONTINUA

Tabela 2. Análise de variância do efeito da temperatura, do tempo sob pressão e do tempo à pressão zerada nas propriedades mecânicas dos compensados de 12 mm.

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
TxTePxTePz	f _M	99,279	1	99,279	1,941	0,173
	E _M	673961	1	673961	0,702	0,408
	f _H	339046	1	339046	3,158	0,085
	f _{gv,0}	0,117	1	0,117	0,928	0,343
Erro	f _M	1636,645	32	51,145		
	E _M	3,071x10 ⁷	32	959684,4		
	f _H	3435722,2	32	107366,3		
	f _{gv,0}	4,038	32	,126		
Total	f _M	79129,859	40			
	E _M	5,193x10 ⁸	40			
	f _H	2,684x10 ⁸	40			
	f _{gv,0}	119,304	40			

APÊNDICE 4 – TEMPO E TEMPERATURA NOS TRATAMENTOS ONDE
OCORRERAM AJUSTES DA PRENSA PARA MANTER PRESSÃO CONSTANTE
NOS COMPENSADOS DE 12 E 20 MM

Tabela 1. Tempo e temperatura nos tratamentos 1 a 4 (120°C) onde ocorreram ajustes da prensa para manter pressão constante nos compensados de 12 mm.

Ajustes	Tratam. 1		Tratam. 2		Tratam. 3		Tratam. 4	
	Tempo (min:s)	Temp. (°C)						
1° ajuste	00:39	74,9	00:32	59,2	00:21	63,4	00:20	58,3
2° ajuste	01:06	88,1	00:56	80,2	00:41	77,2	00:37	72,3
3° ajuste	01:32	96,2	01:21	92,9	01:02	88,2	00:57	83,9
4° ajuste	02:03	102,5	01:49	100,4	01:22	96,8	01:17	93,6
5° ajuste	03:15	107,0	02:31	104,1	01:48	101,3	01:43	100,1
6° ajuste	-	-	04:03	111,4	02:26	104,7	02:23	106,0
7° ajuste	-	-	-	-	03:55	111,7	04:06	113,6

Tabela 2. Tempo e temperatura nos tratamentos 5 a 8 (150°C) onde ocorreram ajustes da prensa para manter pressão constante nos compensados de 12 mm.

Ajustes	Tratam. 5		Tratam. 6		Tratam. 7		Tratam. 8	
	Tempo (min:s)	Temp. (°C)						
1° ajuste	00:09	58,8	00:10	47,8	00:11	51,0	00:09	49,2
2° ajuste	00:20	69,0	00:18	60,6	00:22	66,3	00:16	58,2
3° ajuste	00:32	84,9	00:30	78,7	00:35	93,2	00:26	71,6
4° ajuste	00:44	97,8	00:42	91,4	00:49	100,9	00:37	82,9
5° ajuste	00:58	106,2	00:55	101,7	01:08	107,2	00:49	94,0
6° ajuste	01:17	115,8	01:13	107,7	01:49	118,4	01:07	105,1
7° ajuste	02:12	130,0	01:56	122,1	04:10	144,0	01:47	118,2
8° ajuste	-	-	-	-	-	-	05:55	151,5

Tabela 3. Tempo e temperatura nos tratamentos 1 (120°C) e 2 (150°C) onde ocorreram ajustes da prensa para manter pressão constante nos compensados de 20 mm.

Ajustes	Tratam. 1		Tratam. 2	
	Tempo (min:s)	Temp. (°C)	Tempo (min:s)	Temp. (°C)
1° ajuste	00:09	49,8	00:03	51,5
2° ajuste	00:15	51,9	00:07	53,1
3° ajuste	00:21	53,3	00:12	55,0
4° ajuste	00:30	54,9	00:17	57,0
5° ajuste	00:40	58,0	00:24	60,0
6° ajuste	00:51	63,0	00:31	64,5
7° ajuste	01:01	68,0	00:38	69,5
8° ajuste	01:13	73,1	00:47	74,8
9° ajuste	01:25	78,9	00:56	81,2
10° ajuste	01:37	85,7	01:07	88,3
11° ajuste	01:53	90,8	01:18	94,6
12° ajuste	02:11	96,8	01:34	103,8
13° ajuste	02:38	103,8	01:59	111,2
14° ajuste	03:22	111,6	02:38	120,6
15° ajuste	04:45	121,8	04:01	136,5

APÊNDICE 5 – MASSA ESPECÍFICA APÓS O TRATAMENTO E APÓS O ENSAIO
DE INCHAMENTO EM ESPESSURA DOS COMPENSADOS DE 12 E 20 MM

Tabela 1. Massa específica após o tratamento (ME_{AT}) e após o ensaio de inchamento em espessura (ME_{IE}) dos compensados de 12 mm.

Tratamentos	ME_{AT} (g/cm ³)	ME_{IE} (g/cm ³)
T1 (120°C, 7', 15')	0,61 (1,42)	0,47 (3,18)
T2 (120°C, 7', 30')	0,58 (3,04)	0,46 (5,99)
T3 (120°C, 12', 15')	0,63 (2,71)	0,46 (5,64)
T4 (120°C, 12', 30')	0,63 (3,00)	0,49 (5,21)
T5 (150°C, 7', 15')	0,55 (0,98)	0,49 (3,65)
T6 (150°C, 7', 30')	0,56 (4,87)	0,48 (2,78)
T7 (150°C, 12', 15')	0,61 (2,34)	0,53 (3,04)
T8 (150°C, 12', 30')	0,60 (4,28)	0,52 (7,72)

Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%).

Tabela 2. Massa específica após o tratamento (ME_{AT}) e após o ensaio de inchamento em espessura (ME_{IE}) dos compensados de 20 mm.

Tratamentos	ME_{AT} (g/cm ³)	ME_{IE} (g/cm ³)
T1 (120°C, 7', 15')	0,59 (5,07)	0,47 (4,45)
T2 (150°C, 7', 15')	0,64 (7,86)	0,50 (3,02)

Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%).

APÊNDICE 6 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA PARA AS PROPRIEDADES DOS LVLS
AVALIADAS DE ACORDO COM O TRATAMENTO

Tabela 1. Estatística descritiva para as propriedades físicas dos LVLs.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
IE2h	Test. (150°C, 1 MPa, 20')	2,929578	1,3042916	9
	T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	7,237638	2,0929198	9
	T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	7,183022	3,1677348	9
IE24h	Test. (150°C, 1 MPa, 20')	4,609537	1,6947204	9
	T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	10,381712	2,2800446	9
	T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	7,313519	2,3051468	9
ABS2h	Test. (150°C, 1 MPa, 20')	29,003402	5,5898378	9
	T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	37,016701	9,0347711	9
	T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	37,299407	7,4083918	9
ABS24h	Test. (150°C, 1 MPa, 20')	79,609155	6,7834219	9
	T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	91,039377	11,29462	9
	T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	76,568509	12,51576	9
TNRE	Test. (150°C, 1 MPa, 20')	1,9344	0,21172	9
	T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	3,9985	2,48373	9
	T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	13,3258	12,18913	9
TUE	Test. (150°C, 1 MPa, 20')	13,4180	0,63053	9
	T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	13,4524	1,54935	9
	T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	15,2217	1,04791	9

Tabela 2. Estatística descritiva para as propriedades mecânicas dos LVLs.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Repetições
f_M	Test. (150°C, 1 MPa, 20')	44,518649	8,8156541	9
	T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	42,215991	6,3591634	6
	T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	43,585606	4,7480363	6
E_M	Test. (150°C, 1 MPa, 20')	6118,343072	2791,7943072	9
	T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	4191,856518	412,1373317	6
	T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	4281,268949	643,3661091	6
f_H	Test. (150°C, 1 MPa, 20')	1285,965000	190,6893356	4
	T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	1169,756250	95,3592359	4
	T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	1412,923750	415,9590308	4
$f_{gv,0}$	Test. (150°C, 1 MPa, 20')	2,521325	0,5316249	5
	T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	2,015796	0,1530369	4
	T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	1,935364	1,1359905	4

APÊNDICE 7 - COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS LVLS TRATADOS COM
AS PROPRIEDADES DA TESTEMUNHA

Tabela 1. Análise de variância para as propriedades físicas dos LVLs

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
Tratamento	IE2h	109,962	2	54,981	10,235	0,001
	IE24h	150,130	2	75,065	16,825	0,000
	ABS2h	399,350	2	199,675	3,571	0,044
	ABS24h	1047,905	2	523,952	4,760	0,018
	TNRE	663,068	2	331,534	6,426	0,006
	TUE	19,155	2	9,577	7,374	0,003
	Erro	IE2h	128,928	24	5,372	
IE24h		107,075	24	4,461		
ABS2h		1342,061	24	55,919		
ABS24h		2641,820	24	110,076		
TNRE		1238,309	24	51,596		
TUE		31,169	24	1,299		
Total		IE2h	238,891	26		
	IE24h	257,205	26			
	ABS2h	1741,411	26			
	ABS24h	3689,725	26			
	TNRE	1901,377	26			
	TUE	50,324	26			

Tabela 2 Análise de variância para as propriedades mecânicas dos LVLs.

Fonte de Variação	Propriedade	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	Significância
Tratamento	f_M	24,074	2	12,037	0,239	0,790
	E_M	$2,014 \times 10^7$	2	$1,007 \times 10^7$	3,214	0,061
	f_H	118337,908	2	59168,954	0,812	0,474
	$f_{gv,0}$	0,929	2	0,465	0,916	0,431
Erro	f_M	1057,957	21	50,379		
	E_M	$6,578 \times 10^7$	21	3132446,706		
	f_H	655433,166	9	72825,907		
	$f_{gv,0}$	5,072	10	0,507		
Total	f_M	1082,031	23			
	E_M	$8,592 \times 10^7$	23			
	f_H	773771,073	11			
	$f_{gv,0}$	6,002	12			

APÊNDICE 8 – TEMPO E TEMPERATURA NOS TRATAMENTOS ONDE
OCORRERAM AJUSTES DA PRENSA PARA MANTER PRESSÃO CONSTANTE
NOS PAINÉIS LVL

Tabela 1. Tempo e temperatura nos tratamentos onde ocorreram ajustes da prensa para manter pressão constante nos LVLs.

Ajustes	Testemunhas		Tratamento 1		Tratamento 2	
	Tempo (min:s)	Temp. (°C)	Tempo (min:s)	Temp. (°C)	Tempo (min:s)	Temp. (°C)
1° ajuste	4:00*	100,5	00:11	97	00:10	52
2° ajuste	6:00*	102	00:36	97	00:13	57
3° ajuste	8:00*	105	01:12	100	00:18	69
4° ajuste	10:00*	112,5	02:23	103	00:27	87
5° ajuste	12:00*	121	05:00*	112	00:45	101
6° ajuste	14:00*	131,5	07:52	123	02:27	142,5
7° ajuste	16:00*	139	11:00*	144	06:32*	154
8° ajuste	18:00*	144	14:00*	150	09:32*	158,5
9° ajuste	20:00*	147,5	17:00*	152	13:28*	161,5
10° ajuste			20:00*	154	15:32*	163,5
11° ajuste					18:32*	164
12° ajuste					20:00*	163

Nos tempos assinalados com asterisco (*) a temperatura foi registrada sem que a prensa tenha efetuado o ajuste.

APÊNDICE 9 – MASSA ESPECÍFICA APÓS O TRATAMENTO E APÓS O ENSAIO
DE INCHAMENTO EM ESPESSURA DOS PAINÉIS LVL

Tabela 1. Massa específica após o tratamento (ME_{AT}) e após o ensaio de inchamento em espessura (ME_{IE}) dos painéis LVL.

Tratamentos	ME_{AT} (g/cm ³)	ME_{IE} (g/cm ³)
T1 (150°C, 1,47MPa, 20')	0,44 (9,89)	0,37 (8,56)
T2 (150°C, 2,94MPa, 20')	0,48 (8,57)	0,45 (9,44)

Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (%).