

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**MODIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA DA MADEIRA DE
AMESCLA (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.):
EFEITO SOBRE AS PROPRIEDADES DE LÂMINAS E
COMPENSADOS**

LARISSA MEDEIROS ARRUDA

**ORIENTADOR: Prof.º Dr. CLÁUDIO HENRIQUE S. DEL
MENEZZI**

CO-ORIENTADOR: Dr. DIVINO ETERNO TEIXEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM – 174/2012

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO/2012

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

**MODIFICAÇÃO TERMOMECAÂNICA DA MADEIRA DE AMESCLA
(*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.): EFEITO SOBRE AS
PROPRIEDADES DE LÂMINAS E COMPENSADOS**

LARISSA MEDEIROS ARRUDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO 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 OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

APROVADA POR:

Orientador

Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi (Departamento de Engenharia Florestal, UnB)

Examinador Externo

Dr. Mário Rabelo de Souza (Laboratório de Produtos Florestais, Serviço Florestal Brasileiro)

Examinador Interno

Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale (Departamento de Engenharia Florestal, UnB)

Examinador Suplente

Prof. Dr. Joaquim Carlos Gonzalez (Departamento de Engenharia Florestal, UnB)

Brasília, 27 de fevereiro de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília. Acervo 998261.

A779m Arruda, Larissa Medeiros.
Modificação termomecânica da madeira de *amescla* (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.) : efeito sobre as propriedades de lâminas e compensados / Larissa Medeiros Arruda. -- 2012.
xii, 108 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, 2012.
Inclui bibliografia.
Orientação: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi ;
Co-orientação: Divino Eterno Teixeira.

1. Madeira - Tratamento térmico. 2. Mecânica aplicada . I. Del Menezzi, Cláudio Henrique Soares. II. Teixeira, Divino Eterno. III. Título.

CDU 634.0.81

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARRUDA, L. M. (2012). Modificação Termomecânica da Madeira de *amescla* (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.): Efeito sobre as Propriedades de Lâminas e Compensados. Dissertação de Mestrado. Publicação PPGEFL.DM – 174/2012. Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília, Brasília, - DF, 108 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Larissa Medeiros Arruda

TÍTULO: Modificação Termomecânica da Madeira de *amescla* (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.): Efeito sobre as Propriedades de Lâminas e Compensados.

GRAU: Mestre ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Larissa Medeiros Arruda

Endereço eletrônico: calliandra.sp@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Joalice e Dorival, e ao meu irmão Igor por estarem comigo todos os dias e pelo apoio incondicional, sempre.

Agradeço ao meu noivo Francisco pelo carinho e por compartilhar comigo os sonhos de uma vida inteira que teremos pela frente.

Ao meu orientador Cláudio Del Menezzi pela idealização desse projeto e por acreditar na minha capacidade para realiza-lo. Obrigada pela imensa dedicação e motivação durante esses anos de orientação.

Ao meu co-orientador Divino Teixeira por dividir comigo um pouco do seu conhecimento durante a realização desse projeto.

Aos amigos que sempre estiveram ao meu lado, entendendo e compartilhando minhas angústias, alegrias e sonhos. Em especial agradeço a Marcela, companheira de laboratório e grande amiga nas horas vagas.

Ao Laboratório de Produtos Florestais por permitir a utilização de suas instalações. Em especial agradeço aos funcionários João, Lula, Ricardo e Fernando, pela disponibilidade em ajudar, seja no laboratório ou na serraria.

Ao perito André Lima do Departamento de Balística da Polícia Federal em Brasília, que cedeu um pouco do seu tempo e do seu conhecimento para que a análise das imagens microscópicas pudesse compor esse trabalho.

Ao INCT Madeiras da Amazônia pelo amplo apoio à realização desse projeto, especialmente quanto ao investimento em equipamentos que forneceram precisão e qualidade a esse trabalho e também pela bolsa de mestrado.

A empresa Madeiranit Madeiras Ltda. em Sinop-MT, que cedeu as amostras de lâminas de amescla usadas nesse trabalho e nos recebeu gentilmente em suas instalações.

Pelo apoio financeiro ainda agradeço ao Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação da UnB pelo recurso disponibilizado para viagens de campo e ao CNPq pelo recurso concedido por meio de edital universal (processo n° 474930/2010-6) para compra de equipamentos e utensílios que auxiliaram a execução desse trabalho.

A empresa SI Crios pela doação da resina fenol-formaldeído usada na colagem das lâminas.

RESUMO

MODIFICAÇÃO TERMOMECÂNICA DA MADEIRA DE AMESCLA (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.): EFEITO SOBRE AS PROPRIEDADES DE LÂMINAS E COMPENSADOS

O tratamento termomecânico é uma técnica que combina um tratamento térmico com a compressão mecânica da madeira visando obter um produto com menor capacidade higroscópica sem que isso prejudique sua resistência mecânica. Acerca disso, o objetivo do trabalho foi avaliar a influência do tratamento termomecânico em lâminas de amescla (*Trattinnickia burseraefolia*) para a confecção de compensados. As lâminas foram produzidas em um torno desenrolador na cidade de Sinop-MT. O tratamento foi feito em uma prensa hidráulica a temperaturas de 140°C e 180°C, tempos de um e dois minutos e pressão constante de 2,7 N/mm². Após climatização, foram produzidos compensados com cinco lâminas, com resina fenólica a temperatura de 150°C, tempo de 7 minutos e pressão de 1 N/mm². Foi avaliada a rugosidade, a colorimetria, a molhabilidade e a densidade aparente das lâminas antes e depois do tratamento. Os compensados quanto à flexão estática, compressão paralela, dureza e cisalhamento na linha de cola. O teor de umidade de equilíbrio, inchamento em espessura e absorção de água foram usados para avaliar a estabilidade dimensional das lâminas e dos compensados. O tratamento mostrou que a rugosidade e a molhabilidade das lâminas foram reduzidas, o que pode ter sido responsável pela melhora da resistência na linha de cola dos compensados. O tratamento se mostrou positivo também no aumento da densidade aparente e das propriedades mecânicas, como a dureza, a resistência à compressão paralela, o cisalhamento na linha de cola e o módulo de elasticidade. O módulo de ruptura não foi comprometido com a aplicação do tratamento. Em termos de estabilidade dimensional, o material tratado apresentou maior inchamento em espessura e não apresentou menor absorção de água, devido a liberação das tensões de compressão. Porém, houve diminuição do teor de umidade de equilíbrio, mostrando que o tratamento foi eficiente em reduzir a higroscopicidade da madeira e deixando o compensado mais estável a condições atmosféricas variáveis. O problema das tensões de compressão poderia ser resolvido com a aplicação de um pós-tratamento adequado. Para estudos futuros recomenda-se estudar relações entre a densificação das lâminas e a redução do tempo e da quantidade de cola na produção do compensado.

Palavras-chave: modificação termomecânica, compensados, madeira tropical.

ABSTRACT

THERMOMECHANICAL MODIFICATION OF AMESCLA WOOD (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.): EFFECT ON VENER AND PLYWOOD PROPERTIES

The thermomechanical treatment is a technique which combines a heat treatment with mechanical compression to obtain a product with less hygroscopic capacity without compromising its strength. Thus, the aim of this work was to evaluate the influence of the thermomechanical treatment in veneers of amescla (*Trattinnickia burseraefolia*) for the plywood production. It was used rotary peeled veneers of amescla obtained at city of Sinop in Mato Grosso State. The veneers were treated in a hydraulic press at temperatures of 140 °C and 180 °C, times of one and two minutes and constant pressure of 2,7 N. mm². After conditioning, plywoods with five veneers were produced with phenol-formaldehyde resin, temperature of 150 °C, time of 7 minutes and pressure of 1 N. mm². It was assessed the roughness, colour changes, wettability and density of the veneers, before and after the treatment. The plywoods were also assessed physically and mechanically on the static bending, parallel compression, hardness and shear strength in the glue line. The equilibrium moisture content, thickness swelling and absorption of water were used to assess the dimensional stability of the veneers and the plywoods. The results showed that roughness and wettability of the veneers have been reduced, and that has improved the shear strength in the glue line of the plywood. The treatment was positive in relation to increase the density and the mechanical properties, especially the hardness, the resistance to the parallel compression, the shear strength in the glue line and the elastic modulus. The strength in static bending was not impaired after the thermomechanical treatment. In terms of dimensional stability, the treated material had a higher thickness swelling and did not show lower water absorption, due to release of the compressive stresses. However, the equilibrium moisture content has been reduced, showing that treatment was effective in reduce the hygroscopicity of wood and leaving the plywood more stable the weather variations. The problem with compressive stresses could be resolved with the implementation of a post-treatment. For further studies it is recommended to study the relationships between the densification of veneers with the reduction of time and quantity of adhesive in the production of plywood.

Keywords: thermomechanical modification, plywood, tropical wood

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO	4
1.2	HIPÓTESE	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	ÁGUA NA MADEIRA E MOLHABILIDADE	4
2.2	TRATAMENTO TÉRMICO	9
2.3	TRATAMENTO TERMOMECÂNICO	12
2.3.1	Histórico	12
2.3.2	Polímeros amorfos da madeira	16
2.3.3	Efeito da compressão sobre as propriedades da madeira	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	A ESPÉCIE <i>TRATTINNICKIA BURSERAEFOLIA</i> (MART.) WILLD.	25
3.2	OBTENÇÃO DAS LÂMINAS	26

CAPÍTULO 2 - EFEITO DO TRATAMENTO TERMOMECÂNICO SOBRE PROPRIEDADES FÍSICAS E COLORIMÉTRICAS DE LÂMINAS DE AMESCLA

(*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.)

1	INTRODUÇÃO	28
2	MATERIAL E MÉTODOS	29
2.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	30
2.2	CARACTERIZAÇÃO COLORIMÉTRICA	32
2.3	TRATAMENTO TERMOMECÂNICO	33
2.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA	34
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1	CARACTERIZAÇÃO INICIAL	35
3.2	PROPRIEDADES FÍSICAS	36
3.3	ESTABILIDADE DIMENSIONAL	49
3.4	PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS	53
4	CONCLUSÃO	58

CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DOS COMPENSADOS PRODUZIDOS COM LÂMINAS DE AMESCLA (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.) MODIFICADAS TERMOMECHANICAMENTE

1	INTRODUÇÃO	60
2	MATERIAL E MÉTODOS	61
2.1	CONFECÇÃO DOS COMPENSADOS	61
2.2	PRODUÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	62
2.3	PROPRIEDADES FÍSICAS	63
2.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS	64
2.5	ANÁLISE DE IMAGEM	64
2.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	65
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
3.1	EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS PAINÉIS	65
3.2	PROPRIEDADES FÍSICAS	67
3.3	ESTABILIDADE DIMENSIONAL	69
3.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS	75

3.5 ANÁLISE DE IMAGEM.....	83
4 CONCLUSÃO.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXOS.....	95
A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CAPÍTULO 2	95
B – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CAPÍTULO 3	103

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

FIGURA 2.1 – Esquema do ângulo de contato e da linha base. (KRÜSS, 2004).	7
FIGURA 2.2 – Variação do módulo de elasticidade (E) para os polímeros amorfos com o tempo, temperatura e concentração de umidade. A curva “master” denota as regiões do comportamento viscoelástico dos polímeros. Adaptado de Ward (1983) <i>apud</i> Wolcott, Kamke e Dillard (1990).....	18
FIGURA 2.3 – Fotomicrografia da amostra controle e das amostras que passaram pelo tratamento termomecânico em diferentes níveis de densificação (63%, 98% e 132%). A compressão foi feita na direção vertical como mostra as setas (KUTNAR; KAMKE; SERNEK, 2009).	21
FIGURA 2.4 – Falhas nas paredes celulares de Douglas-fir (<i>Pseudotsuga</i> 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 (GEIMER <i>et al.</i> , 1985).	21
FIGURA 2.5 – 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.	23
FIGURA 3.1 – Sequência de produção das lâminas. A) toras de amescla durante o cozimento. B) toras entrando no torno desenrolador. C) saída das lâminas do torno. D) lâminas separadas por qualidade.	26
FIGURA 3.2 – Esquema da laminação no torno desenrolador e o aparecimento das fendas de laminação (SUCHSLAND; JANKOWSKY, 1978).	27

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 – Esquema do tamanho da lâmina e da amostra retirada para caracterização.	29
FIGURA 3.1 – Parâmetros de rugosidade medidos antes e depois do tratamento para os dois lados da lâmina.	37
FIGURA 3.2 – Análise fatorial da temperatura e do tempo para os parâmetros de rugosidade.....	38
FIGURA 3.3 – Perfis de rugosidade nos dois lados, antes e depois do tratamento.	40
FIGURA 3.4 – Molhabilidade da superfície das lâminas de amescla expressa pelo ângulo de contato (em graus) antes e depois do tratamento nos dois lados das lâminas.	42
FIGURA 3.5 – Imagens da gota d’água na superfície da lâmina de amescla no lado sem as fendas (A) e no lado com as fendas (B).	42
FIGURA 3.6 – Análise fatorial da temperatura e do tempo para o ângulo de contato final.	44
FIGURA 3.7 – Densidade aparente das lâminas antes e depois dos tratamentos.	45
FIGURA 3.8 – Taxa de compressão medida imediatamente após o tratamento (TC imediata) e depois da climatização (TC definitiva).....	46
FIGURA 3.9 – Perda de massa medida imediatamente após o tratamento (PM imediata) e depois da climatização (PM definitiva).....	48
FIGURA 3.10 – Inchamento em espessura das lâminas tratadas termomecanicamente e a comparação com a taxa de compressão.....	50
FIGURA 3.11 – Teor de umidade de equilíbrio das lâminas tratadas termomecanicamente.	52
FIGURA 3.12 – Absorção de água das lâminas tratadas termomecanicamente.	53
FIGURA 3.13 – Média das coordenadas colorimétricas nas lâminas antes e depois do tratamento.	55

FIGURA 3.14 – Efeito da temperatura e do tempo na claridade e no ângulo de tinta da madeira de amescla.....	56
FIGURA 3.15 – Variação da cor (ΔE) na madeira de amescla e o efeito da temperatura e a sua interação com o tempo.	58

CAPÍTULO 3

FIGURA 2.2 – Esquema de produção dos CPs dos painéis: U = teor de umidade; IE = inchamento em espessura; AB = absorção de água; F = flexão estática; C = compressão paralela; D = dureza Janka; DA = densidade aparente; A = área da flexão; Cs = cisalhamento da linha de cola.....	63
FIGURA 3.1 – Evolução da temperatura interna dos painéis compensados produzidos com lâminas não tratadas e tratadas termomecanicamente a 140 °C e 180 °C.....	66
FIGURA 3.2 – Espessura dos compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.....	67
FIGURA 3.3 – Densidade aparente dos compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.....	68
FIGURA 3.4 – Inchamento em espessura em duas horas e 24 horas dos painéis produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.....	69
FIGURA 3.5 – Taxa de não retorno em espessura dos painéis produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.....	71
FIGURA 3.6 – Absorção de água em duas horas e 24 horas dos painéis produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.....	72
FIGURA 3.7 – Teor de umidade de equilíbrio para os compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.....	74
FIGURA 3.8 – Módulo de elasticidade e de ruptura dos compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.....	76
FIGURA 3.9 – Dureza Janka dos compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.....	78
FIGURA 3.10 – Compressão paralela dos compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.....	79
FIGURA 3.11 – Resistência ao cisalhamento na linha de cola para os compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.....	80
FIGURA 3.12 – CP com 100% de falha na madeira no ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola.....	81
FIGURA 3.13 – Regressão linear entre a densidade aparente e a compressão paralela.	83
FIGURA 3.14 – Imagens do estereomicroscópio (20x) para análise geral da densificação e da linha de cola dos compensados. Escala: 1,0 mm.....	83
FIGURA 3.15 – Imagens feitas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) da seção transversal dos compensados, comparando a amostra da testemunha com uma amostra tratada. Escala: 500 μm e WD 12,6 mm.....	84
FIGURA 3.16 – Imagens da superfície das amostras realizada pelo MEV.	85

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

TABELA 2.1 – Resumo das temperaturas de transição vítrea e degradação de componentes da madeira na condição seca e úmida.....	20
---	----

CAPÍTULO 2

TABELA 2.1 – Delineamento experimental do tratamento termomecânico.	33
TABELA 2.2 – Delineamento estatístico por propriedade para o tratamento termomecânico das lâminas.	35
TABELA 3.1 – Características físicas das lâminas de amescla (<i>Trattinnickia burseraefolia</i>) antes do tratamento.....	35
TABELA 3.2 – Comparação entre a rugosidade do lado sem fendas com a do lado com fendas.	39
TABELA 3.3 – Valores dos ângulos de contato finais médios para os dois lados das lâminas de Amescla.	43

CAPÍTULO 3

TABELA 2.1 – Delineamento experimental da produção dos compensados.	62
TABELA 3.1 – Coeficiente de correlação de Pearson para a densidade aparente e as propriedades mecânicas.	82

ANEXO

TABELA A.1 – Estatística descritiva das propriedades físicas das lâminas.	95
TABELA A.2 – Estatística descritiva dos parâmetros de rugosidade das lâminas.	96
TABELA A.3 – Estatística descritiva dos parâmetros colorimétricos das lâminas.	96
TABELA A.4 – Análise de variância do teste-t pareado a 5% de significância para a densidade aparente.....	97
TABELA A.5 – Análise de variância do teste-t pareado a 5% de significância para a rugosidade e molhabilidade.....	97
TABELA A.6 – Análise de variância do teste t-pareado a 5% de significância para os parâmetros de colorimetria.	99
TABELA A.7 – Análise de variância dos parâmetros de rugosidade comparação entre os lados.	100
TABELA A.8 – Análise de variância a 5% de significância com teste post-hoc de Dunnett para as propriedades de estabilidade dimensional.....	101
TABELA A.9 – Análise de variância a 5% de significância para o ΔE	101
TABELA A.10 – Análise fatorial a 5% de significância para as propriedades físicas e colorimétricas das lâminas.....	102
TABELA A.11 – Análise fatorial a 5% de significância para a rugosidade e molhabilidade das lâminas.	102
TABELA B.1 – Estatística descritiva para as propriedades físicas dos compensados.....	103
TABELA B.2 – Estatística descritiva para as propriedades mecânicas dos compensados.....	104
TABELA B.3 – Análise de variância a 5% de significância com teste post-hoc de Dunnett para as propriedades físicas dos compensados.	105
TABELA B.4 – Análise de variância a 5% de significância com teste post-hoc de Dunnett para as propriedades mecânicas dos compensados.....	106
TABELA B.5 – Análise fatorial a 5% de significância para as propriedades físicas dos compensados.....	107

TABELA B.6 – Análise fatorial a 5% de significância para as propriedades mecânicas dos compensados.....	108
---	-----

LISTA DE SIMBOLOS, NOMEMCLATURAS E ABREVIÇÕES

a*	Matiz vermelha
AB	Absorção de água
AC	Ângulo de contato
b*	Matiz amarela
BSE	Back-scattered electron detector
C	Saturação
CP	Corpo-de-prova
E _d	Espessura densificada
E _f	Espessura final
E _m	Rigidez na flexão estática
f _{c,0}	Resistência à compressão paralela
f _{c,90°}	Resistência à compressão perpendicular
f _{gv,0}	Resistência ao cisalhamento na linha de cola
f _H	Dureza Janka
f _M	Resistência na flexão estática
h*	Ângulo de tinta
IE	Inchamento em espessura
IE _H	Inchamento em espessura higroscópico
IE _T	Inchamento em espessura total
IE _{TC}	Inchamento em espessura de tensões de compressão
L*	Claridade
LVL	Laminated veneer lumber
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MOE	Módulo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura
OHT	Oil-Heat treatment
PM	Perda de massa
PNQM	Programa Nacional de Qualidade da Madeira
PSF	Ponto de saturação das fibras
r	Coefficiente de correlação de Pearson
R _a	Rugosidade média
R _t	Soma da altura do pico mais alto e do vale mais profundo
R _z	Soma da altura dos cinco picos mais altos e dos cinco vales mais profundos
TC	Taxa de compressão
T _g	Temperatura de transição vítrea
THM	Tratamento termohigromecânico
TNRE	Taxa de não retorno em espessura
TUE	Teor de umidade de equilíbrio
UV	Ultra-violeta
VTC	Viscoelastic thermal compression
ΔE	Variação da cor

CAPÍTULO 1

DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO

1 INTRODUÇÃO

A madeira possui excelentes propriedades quando comparada com outros materiais. Possui uma excelente trabalhabilidade e ótimas propriedades mecânicas em relação ao seu peso. Além do mais, tem uma boa aparência e proporciona conforto ao ambiente, sendo principalmente utilizada em móveis, pisos, painéis e estruturas (MORSING, 2000).

Entretanto, a madeira é um material que também possui propriedades indesejáveis, que precisam ser melhoradas para tornar seu uso mais eficiente e aumentar o seu campo de aplicações. Isso inclui a instabilidade dimensional devido à higroscopicidade natural da madeira, descoloração e degradação por exposição aos raios UV, propriedades mecânicas não homogêneas e degradação biológica (MORSING, 2000). Essas propriedades indesejáveis têm dado origem a pesquisas sobre tratamentos de estabilização da madeira, incluindo a limitação da adsorção de umidade (VERNOIS, 2001).

A baixa estabilidade dimensional da madeira sob condições atmosféricas variáveis e a baixa durabilidade de muitas espécies são algumas das principais limitações para o seu uso em ambientes externos. Tratamentos químicos, de impregnação e térmicos são empregados para diminuir a capacidade natural da madeira de absorver água (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Destes, o tratamento térmico é o mais conhecido e pelo menos há 90 anos é estudado na Europa e nos Estados Unidos (ESTEVES; PEREIRA, 2009; XIE; LIU; SUN, 2002).

O tratamento térmico consiste em aquecer a madeira sob condições de temperaturas mais altas (95°C a 320°C) do que em condições normais de secagem, oferecendo um produto de menor higroscopicidade e conseqüentemente mais estável por ter menor inchamento e contração (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). O calor atua principalmente na degradação de polímeros higroscópicos, como as hemiceluloses, e reduz a região amorfa da celulose aumentando o seu grau de cristalização, dificultando deste modo, a adsorção de moléculas de água (BHUIYAN *et al.*, 2000, 2001; BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006; DEL MENEZZI, 2004).

Apesar disso, a estabilização da madeira relativa à redução da sua higroscopicidade é sempre acompanhada pela perda de massa e de uma diminuição da resistência mecânica (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; KOCAEFE; PONCSAK; BOLUK, 2008; KUBOJIMA; OKANO; OHTA, 2000; WELZBACHER *et al.*, 2008). Para tentar contornar esse efeito negativo da temperatura podem ser aplicadas técnicas de densificação tais como impregnação de resinas sintéticas nos vazios ou compressão mecânica concomitante com calor, o que é conhecido como tratamento termomecânico (KULTIKOVA, 1999; KUTNAR; SERNEK, 2007; MORSING, 2000; WELZBACHER *et al.*, 2004).

O tratamento termomecânico pode ser feito a seco, com vapor (termohigromecânico) ou com água (termohidromecânico). É mais comum que a compressão seja feita na presença de umidade, pois facilita o amolecimento da parede celular, tornando a madeira mais maleável (KUTNAR; KAMKE, 2012). Vários autores aplicam um pós-tratamento após a compressão para aliviar as tensões e melhorar a estabilidade dimensional evitando que a peça sofra mudanças dimensionais durante o uso (WELZBACHER *et al.*, 2004; MORSING, 2000; CLOUTIER; FANG; MARIOTTI, 2008; KUTNAR; KAMKE; SERNEK, 2009; KUTNAR; KAMKE, 2012).

O tratamento termomecânico é uma oportunidade para que as madeiras leves e porosas tornem-se mais densas e 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 (*Laminated Veneer Lumber*). 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 (BEKHTA; NIEMZ; SEDLIACIK, 2012; BEKHTA; MARUTZKY, 2007; KUROWSKA *et al.*, 2010).

Apesar disso, é um tratamento que tem sido estudado apenas em países europeus e nos Estados Unidos onde se utilizam principalmente madeiras de clima temperado. O Brasil está muito atrás nesse segmento tecnológico, mesmo sendo o segundo maior produtor de madeira em tora e o quarto maior produtor de lâminas tropicais do mundo (INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION – ITTO, 2010).

Quando se trata apenas das madeiras tropicais a falta de tecnologia pode ser ainda mais dramática. Segundo estimativas de Higuchi *et al.* (2006), em 2020 Malásia e Indonésia poderão deixar de abastecer os mercados internacionais de madeira tropical, o que fará com que as expectativas de abastecimento sejam voltadas para a Amazônia.

Caso o Brasil não esteja preparado para administrar a exploração de madeira na Amazônia, essa oportunidade de negócios pode transformar-se em desastre ambiental.

Por isso Clement e Higuchi (2006) comentam que o maior desafio é transformar essa crise no abastecimento de madeiras tropicais em oportunidades para a Amazônia. Porém, transformar toda a capacidade volumétrica de madeira tropical do Brasil em crescimento econômico e desenvolvimento social, mantendo a qualidade ambiental, não é tão simples. As principais dificuldades apontadas pelos autores para a Amazônia são o baixo nível tecnológico na transformação da madeira em produtos, o grande desperdício e a falta de mercado para a maioria das espécies amazônicas.

Com o objetivo de atender a esses gargalos na Amazônia, surgiu por incentivo do Ministério da Ciência e Tecnologia o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) Madeiras da Amazônia, criado para atender as demandas do manejo florestal sustentável e da tecnologia da indústria florestal da região. O INCT Madeiras da Amazônia envolve o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e as Universidades Federais do Paraná (UFPR) e do Amazonas (UFAM), a Universidade Estadual do Amazonas (UEA) e a Universidade de Brasília (UnB).

Dentre os objetivos apresentados para o Madeiras da Amazônia estão contempladas as técnicas inovadoras para produção de madeiras de alta qualidade e valor agregado. A inserção desse trabalho nesse projeto justifica-se então porque o tratamento termomecânico é uma dessas técnicas e que, como já explicado, visa principalmente aumentar a qualidade dos painéis de madeiras sólidas tornando-os mais estáveis nas suas dimensões e mais resistentes mecanicamente. Além disso, a aplicação desse tratamento em amescla pode incentivar pesquisas com outras tropicais menos utilizadas, aliviando a pressão sobre aquelas mais procuradas.

Nesse contexto, o trabalho está dividido em três capítulos. O primeiro apresenta uma descrição geral do estudo, abordando uma introdução geral, os objetivos gerais, a hipótese, revisão bibliográfica geral e materiais e método geral. O segundo capítulo enfatiza a caracterização termomecânica da lâmina, apresentando as propriedades físicas e colorimétricas do material antes e depois do tratamento. Por fim, o terceiro capítulo avalia a influência do tratamento termomecânico das lâminas nas propriedades dos compensados.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral é analisar o efeito do tratamento termomecânico sobre as lâminas de amescla (*Trattinnickia burseraefolia*) e sobre os compensados produzidos com essas lâminas.

1.2 HIPÓTESE

Os compensados terão melhor resistência mecânica e melhor estabilidade dimensional em função da aplicação do tratamento termomecânico nas lâminas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ÁGUA NA MADEIRA E MOLHABILIDADE

A água é o principal constituinte das células vegetais, podendo em alguns casos, chegar até a 96% de sua constituição. É o meio para difusão de solutos nas células e possui alta capacidade calorífica servindo como um importante regulador de temperatura no vegetal. É fundamental também para a sustentação dos tecidos vegetais, devido a sua incompressibilidade além de ser o solvente para a maioria das reações bioquímicas (REICHARDT, 1985).

A árvore absorve do solo a água e os sais minerais que irão constituir a seiva bruta e percorrer os vasos chegando até as folhas. O caminho contrário, das folhas às raízes, transporta a seiva elaborada, constituída de água e produtos da fotossíntese. Dessa forma a árvore viva ou recém abatida tem um alto teor de umidade, pois os vasos, canais, lumens e paredes das células da madeira estão completamente saturados de água. Quando isso ocorre diz-se que o teor de umidade é máximo e este pode variar de 30% a mais de 200% em relação ao peso da madeira (JANKOWSKY, 1990; REEB, 1995; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

A madeira seca é principalmente composta por celulose, lignina, hemicelulose e uma pouca porção (de 5% a 10%) de extrativos. Os carboidratos correspondem a 65-75% e a lignina corresponde a 18-35% (ROWELL *et al.*, 2005). A celulose é composta

por unidades de glucose ($C_6 H_{12} O_6$) que se organizam em feixes chamados fibrilas elementares que por sua vez formam as microfibrilas. E por fim, uma agregação de microfibrilas forma uma fibrila (MILLER, 1931; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). As fibrilas e microfibrilas, segundo Reeb (1995), são o principal componente da parede da célula e desempenham um importante papel na relação água-madeira.

Em alguns pontos das fibrilas elementares as moléculas de celulose estão dispostas de maneira desordenada, em outros elas se dispõem ordenadamente, formando as micelas de estrutura cristalina. Na região cristalina os grupos OH das moléculas de celulose estão interligados o que significa que não há sítios livres para a adsorção das moléculas de água. Segundo o Forest Products Laboratory (2010) e Rowell *et al.* (2005) cerca de 65% da molécula de celulose é cristalina. A outra região da celulose é chamada de amorfa onde há certa desordem, e os grupos OH não estão interligados, encontrando-se disponíveis para fazer ligações com as moléculas de água (DEL MENEZZI, 2004; ROWELL *et al.*, 2005).

As hemiceluloses são um pouco parecidas com a celulose e estão associadas a ela por ramificações. Atuam como matriz para a celulose e aumentam a densidade da parede celular (ROWELL *et al.*, 2005). São compostas por diversos tipos de monômeros de açúcar, como pentoses e hexoses que variam bastante entre espécies (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; ROWELL *et al.*, 2005). São considerados os polímeros mais higroscópicos da madeira e altamente relacionados com o inchamento e adsorção de água (SKAAR, 1988; STAMM, 1964).

A higroscopicidade de um material é a propriedade que o permite adsorver água e a hidrofiliabilidade é a afinidade de um material à água, ou ainda, é uma propriedade física que uma molécula tem temporariamente de aglutinar-se a uma molécula de água através das ligações de hidrogênio. A madeira é ao mesmo tempo higroscópica e hidrofílica. A hidrofiliabilidade da madeira permite que ela adsorva umidade em forma de vapor disperso no ambiente, e junto com a porosidade permite que a madeira absorva água líquida (PIAO; WINANDY; SHUPE, 2010).

É sabido que a umidade na madeira está presente como água livre, água de adesão e vapor d'água. A água livre está localizada nos vasos, nos canais e no lúmen das células, enquanto que a água de adesão está dentro da parede celular, adsorvida pela atração das hidroxilas na celulose, hemicelulose, e em menor quantidade na lignina (JANKOWSKY, 1990; PIAO; WINANDY; SHUPE, 2010; REEB, 1995). O vapor

d'água é encontrado no lúmen celular e em outras cavidades. Este pode ser adsorvido dentro da parede celular tornando-se água de adesão ou condensando e tornando-se água livre quando a parede está saturada (ROWELL; BANKS, 1985).

Quando a árvore começa o processo de secagem, assim que é abatida, toda a água livre tende a sair, restando apenas a água no interior das paredes celulares que estão saturadas. Essa umidade varia convencionalmente entre 28% e 30% e esse estágio é chamado de Ponto de Saturação das Fibras (PSF). Algumas espécies têm um conteúdo de extrativos (compostos orgânicos presentes no lúmen e entre as microfibrilas da parede celular) muito alto e isso diminui o seu PSF (REEB, 1995).

O PSF não acontece em todas as células da madeira ao mesmo tempo. Algumas células podem ter atingido o PSF enquanto outras células não, principalmente em peças de madeira muito grandes. À medida que a madeira perde a água de adesão e o teor de umidade da maioria das células cai abaixo do PSF, as microfibrilas encolhem e a madeira começa a retrair. Quando a umidade é adicionada, a madeira incha quando a maioria das células atinge o PSF (REEB, 1995).

As variações dimensionais da madeira, inchamento e retração, provocam efeitos indesejáveis, limitando seu uso para diversas finalidades, ou ainda exigindo técnicas especiais de utilização (SILVA; OLIVEIRA, 2003). Como o hidrogênio presente na água liga-se aos grupos hidroxilas presente na parede celular dos compostos da madeira, a célula expande-se para acomodar a água. Então qualquer tratamento que reduza a tendência da madeira em absorver água irá reduzir a tendência ao inchamento e melhorar as limitações da madeira quanto ao uso (ROWELL; YOUNGS, 1981).

Como já mencionado anteriormente, a madeira é um material hidrofílico, ou seja, tem afinidade com a água. A hidroflicidade está diretamente relacionada com a molhabilidade, ou seja, o contato molecular entre um líquido e um substrato sólido. Por causa da hidroflicidade a madeira é molhável por substâncias aquosas ou adesivos polares. De fato, uma boa molhabilidade é um indicativo da qualidade da adesão do adesivo (PIAO; WINANDY; SHUPE, 2010).

Quando uma gota é depositada sobre uma superfície horizontal, três interações podem ser observadas: líquido-vapor; vapor-sólido e sólido-líquido. Em qualquer posição paralela ao substrato, o perfil do líquido depositado é visto como um ângulo θ na linha de contato entre líquido-vapor-sólido (PIAO; WINANDY; SHUPE, 2010), de acordo com a Figura 2.1.

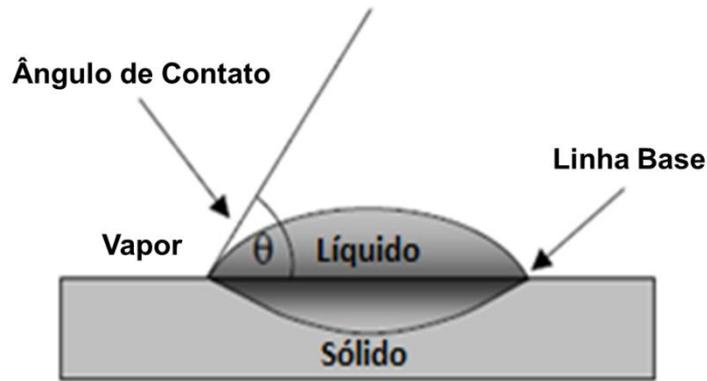


FIGURA 2.1 – Esquema do ângulo de contato e da linha base. (KRÜSS, 2004).

Uma das primeiras noções de relações entre a superfície e o ângulo de contato para um líquido depositado foi idealizada pela equação de Young de 1805 (Equação 2.1) (MANTANIS; YOUNG, 1997).

$$Y_{SV} - Y_{SL} = Y_{LV} \cdot \cos \theta \quad (2.1)$$

Onde:

Y_{SV} = tensão interfacial entre o sólido e o vapor;

Y_{SL} = tensão superficial entre o sólido e o líquido;

Y_{LV} = tensão superficial entre o líquido e o vapor;

θ = ângulo de contato.

Com base na equação de Young, anos depois surgiram outras equações para estudar a energia termodinâmica da interação ou trabalho da adesão (Equação de Dupré, 1869), o trabalho da adesão calculado a partir do ângulo de contato (Equação de Wilhelmy, 1896), interações polares entre as moléculas na superfície (Equação de Fowkes, 1962), entre outras (MANTANIS; YOUNG, 1997).

A determinação das tensões do sólido-vapor e do sólido-líquido é de grande importância para a ciência aplicada. Porém, por causa da dificuldade em determinar essas tensões na fase sólida, vários métodos são adotados para estimá-las, sendo o mais simples o do ângulo de contato (KWOK; NEUMANN, 1999).

A medição do ângulo de contato é estabelecida facilmente pela medição do ângulo θ , formado pela base da gota com o sólido. A simples medição do ângulo permite estimar as interações entre o sólido-vapor e o sólido-líquido (Equação de Young). Porém essa simplicidade pode ser muito enganosa (KWOK; NEUMANN, 1999), pois a medição desse ângulo necessita de um equipamento específico (goniômetro) geralmente acoplado a uma câmara de alta resolução.

O método direto mais utilizado para medição do ângulo de contato é o da gota sésil. Nesse método, uma gota de um líquido devidamente purificado é depositada sobre a superfície de um sólido por meio de uma micro seringa. A gota é observada com uma lente de baixo aumento, e o ângulo de contato é medido através de um goniômetro (BUZETO; CAMPOS, 2004).

O valor do ângulo de contato de uma gota de líquido depende da energia de superfície da amostra e da tensão superficial do líquido. Se a gota se esparramar por toda superfície do material seu ângulo de contato será de aproximadamente zero, mas se o espalhamento for parcial o ângulo de contato variará de 0 a 180 graus (BUZETO; CAMPOS, 2004).

Dessa forma, um maior ângulo de contato representa áreas hidrofóbicas na superfície, enquanto um ângulo menor caracteriza áreas hidrofílicas. O comportamento de uma gota d'água na superfície da madeira é geralmente diferente do comportamento na superfície de um metal ou polímero. Além de espalhar pela superfície da madeira a água também penetra, portanto, a molhabilidade ocorre na superfície e sob ela. O formato e o ângulo de contato de uma gota sésil depositada na superfície muda com o tempo e se torna mais ou menos estável ou equilibrada depois de certo período de que o ângulo de contato está sendo mensurado (PIAO; WINANDY; SHUPE, 2010).

A sorção de um líquido na madeira e a evaporação desse próprio líquido é um processo contínuo durante a medição do ângulo de contato. O equilíbrio madeira-vapor-líquido é relativamente temporário. Se o ângulo de contato for mensurado antes do equilíbrio ter sido atingido, a mensuração do ângulo pode ser superestimada porque o líquido continua sendo espalhado e absorvido. Se o ângulo de contato é mensurado algum tempo depois do equilíbrio, a mensuração do ângulo de contato pode ser subestimada por causa da evaporação do líquido e da penetração na madeira (PIAO; WINANDY; SHUPE, 2010). Por isso a medição do ângulo de contato deve ser feita de forma contínua durante todo o processo de sorção da gota d'água na madeira.

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico consiste simplesmente na aplicação de calor por determinado período, definido conforme o objetivo final de utilização da madeira. Stamm, Burr e Kline (1946) definiram a madeira tratada termicamente como “*Staybwood*” numa alusão a estabilização dimensional da madeira conseguida após o tratamento térmico. Segundo esses autores, “*Staybwood*” é a madeira não prensada que atingiu a estabilização dimensional apenas com o calor.

Os efeitos do tratamento térmico geralmente são estudados na faixa de temperatura de 150 °C a 260 °C e durações que variam de minutos a horas (STAMM; BURR; KLINE, 1946; VERNON, 2001; ESTEVES; DOMINGOS; PEREIRA, 2008; ESTEVES; PEREIRA, 2009). No entanto, os primeiros estudos com tratamentos térmicos realizados por Stamm, Burr e Kline (1946) utilizaram temperaturas superiores a 300°C e tempos maiores que uma semana. Aplica-se, geralmente, uma temperatura baixa com um tempo maior ou uma temperatura mais severa e menor tempo, podendo surgir uma quantidade ilimitada de tratamentos.

O tratamento térmico da madeira cresceu significativamente nos últimos anos e continua crescendo como processo industrial para melhorar algumas propriedades da madeira (ESTEVES; PEREIRA, 2009). O atual interesse pela busca por materiais mais sustentáveis tanto como duráveis, assim como as barreiras governamentais para a maioria dos aditivos químicos para preservação da madeira, renovou o mercado da madeira termicamente tratada. Existem basicamente hoje em dia cinco métodos comerciais diferentes de tratamentos térmicos: um na Finlândia (*ThermoWood*), um na Holanda (*PlatoWood*), um na Alemanha (OHT – *Oil-Heat Treatment*) e dois na França (*Bois Perdure* e Retificação). Esses métodos usam diferentes formas de aquecimento: óleo quente, água, vapor, vapor d’água saturado e nitrogênio (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

O processo finlandês, *ThermoWood* usa vapor quente (100 °C – 130 °C) para secar a madeira e também para tratá-la termicamente (185 °C – 215 °C) durante 2 – 3 horas dependendo do uso (THERMOWOOD, 2003). No tratamento térmico *PlatoWood* a madeira é tratada em duas fases. Primeiro termohidromecanicamente, ou seja, mergulhada em um sistema aquoso aquecido com vapor entre 150 °C – 180 °C. Em seguida a madeira é seca em estufa e aquecida novamente em uma estufa especial em um sistema não aquoso entre 150 °C – 190 °C (PLATOWOOD, 2009).

O processo francês de Retificação aquece a madeira lentamente entre 210 °C – 240 °C em uma atmosfera de nitrogênio com menos de 2% de oxigênio. No outro processo francês, *Bois Perdure*, o aquecimento é feito pelo próprio vapor d'água da madeira cuja temperatura ultrapassa os 230 °C (VERNOIS, 2001). O tratamento térmico Alemão é o mais interessante, pois usa óleo vegetal como meio de aquecimento da madeira. A madeira é mergulhada em óleo quente a temperatura máxima de 220 °C e para uma tora de seção transversal de 100 mm x 100 mm e com 4 metros de comprimento todo o processo dura 18 horas (RAPP; SAILER, 2001).

Os efeitos do calor podem ser reversíveis ou irreversíveis. As mudanças imediatas nas propriedades da madeira ocorrem quando a madeira é aquecida ou esfriada rapidamente e testada. Abaixo de 100 °C esses efeitos são reversíveis. Os efeitos passam a ser irreversíveis com o aumento da temperatura e duração do tratamento e estão principalmente ligados a degradação da madeira que resulta em perda de massa e resistência. 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).

O estudo dos efeitos permanentes do calor sobre a madeira é mais interessante do que o estudo dos efeitos temporários. Isso porque o calor além de provocar a secagem, degrada permanentemente parte dos principais compostos higroscópicos da madeira como a celulose amorfa e as hemiceluloses, reduzindo a capacidade de ligação das moléculas de água do ambiente com a madeira (ROWELL; YOUNGS, 1981; DEL MENEZZI, 2004; BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006; KOCAEFE; PONCSAK; BOLUK, 2008). Dessa forma, a redução da higroscopicidade da madeira é um dos principais efeitos positivos causados pelo tratamento térmico.

A higroscopicidade da madeira pode ser medida pelos inchamentos radial, tangencial e longitudinal, sendo este último de valor insignificante. Uma redução no inchamento representa um aumento da estabilidade dimensional, que é requerido para muitos usos da madeira. Outra forma de observar a redução da higroscopicidade da madeira é pelo teor de umidade de equilíbrio (TUE), cuja redução está ligada com a degradação dos compostos higroscópicos da madeira e conseqüentemente com o aumento da estabilidade dimensional (ESTEVES; DOMINGOS; PEREIRA, 2008).

Stamm, Burr e Kline, (1946) comentam que para cada 10 °C de elevação da temperatura no tratamento térmico usando metal fundido como meio de aquecimento consegue-se o dobro de redução da higroscopicidade. De uma forma menos eficiente

que a obtida por Stamm, Burr e Kline, (1946), Korkut *et al.* (2008) e Gündüz, Korkut e Korkut (2008) ainda assim reduziram o inchamento tangencial em 23,53% para *Corylus colurna* L. e em 51,74% para *Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*, respectivamente, tratando a madeira a 180 °C por 10 horas em atmosfera controlada. Esteves, Domingos e Pereira (2008) conseguiram um ganho em estabilidade dimensional de 57% tratando *Pinus pinaster* a 180 °C por 4 horas e também a 190 °C por 2 horas.

Entretanto, a degradação dos compostos higroscópicos e a evaporação de água, extrativos e produtos degradados, implicam em uma perda de massa durante o tratamento (KOCAEFE; PONCSAK; BOLUK 2008). A perda de massa é o efeito mais comumente referido pelos autores como indicativo de qualidade do tratamento térmico e que isso depende da espécie, da forma de aquecimento, da temperatura e do tempo do tratamento (ESTEVES; PEREIRA, 2009).

Com o aumento da temperatura e da duração do tratamento a perda de massa aumenta (ESTEVES; DOMINGOS; PEREIRA, 2008). Stamm, Burr e Kline (1946) demonstram que para conseguir uma eficiência de 40% na estabilidade dimensional a perda de massa é de 8%. Entretanto, aumentando-se a eficiência em 25% a perda de massa aumenta em 125%. Esteves, Domingos e Pereira (2008) observam para amostras de *Pinus pinaster* que há uma redução máxima no TUE quando a perda de massa atinge 4%. Esses mesmos autores observam ainda que a uma temperatura de 170 °C durante 5 horas a perda de massa é menor que 1%. Aumentando-se a temperatura para 200°C e mantendo-se o tempo constante a perda de massa aumenta para 5%.

Os efeitos positivos do tratamento térmico devem ser alcançados com a menor perda de massa possível, pois esta geralmente causa efeitos negativos sobre as propriedades das madeiras tratadas. À medida que aumenta a severidade do tratamento (temperatura e tempo) as propriedades mecânicas são afetadas negativamente. Acredita-se que as madeiras tratadas termicamente tem menor resistência à flexão estática do que as não tratadas, principalmente se o tratamento é feito na presença de oxigênio (KUBOJIMA; OKANO; OHTA, 2000). Isso significa que as propriedades de resistência são mais afetadas que as elásticas, ou seja, na flexão estática o MOE é menos afetado pelo calor que o MOR (KUBOJIMA; OKANO; OHTA, 2000; KOCAEFE; PONCSAK; BOLUK 2008).

Outra característica marcante das madeiras tratadas é a mudança de cor que acontece após o aquecimento por certo período. Stamm, Burr e Kline (1946) comentam

que essa mudança na cor acontece geralmente na temperatura e em períodos suficientes para ter uma melhora na estabilidade dimensional da madeira. Entretanto, segundo Sundqvist, Karlsson e Westermark (2006) o escurecimento da madeira acontece já na primeira hora de tratamento mesmo com uma temperatura um pouco baixa. À medida que aumenta a temperatura do tratamento a madeira escurece mais e entre 160 °C-180 °C ocorre o maior decréscimo de luminosidade da madeira.

A madeira tratada termicamente pode se tornar um pouco mais resistente ao ataque biológico. Weiland e Guyonnet (2003) comentam que algumas moléculas formadas durante a degradação térmica atuam como fungicidas da madeira. Além disso, o tratamento térmico elimina boa parte das hemiceluloses que fazem parte da nutrição dos fungos, impedindo a colonização inicial. Segundo Momohara *et al.* (2003) o aumento da resistência a colonização por fungos pelo tratamento térmico é observado acima dos 135 °C e por mais de 24 horas.

2.3 TRATAMENTO TERMOMECÂNICO

2.3.1 Histórico

A necessidade de obtenção de novos produtos resistentes e duráveis veio a partir da escassez do ferro e do alumínio na época da 2ª guerra mundial (1939-1945) (STAMM; CHIDESTER, 1947). Esses novos produtos incluíam madeiras especialmente tratadas para melhorar suas principais limitações, como a instabilidade dimensional, a higroscopicidade e a degradação por ataque biológico (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). De acordo com Stamm e Chidester (1947) as madeiras modificadas eram geralmente lâminas que sofriam tratamentos para redução do inchamento e às vezes eram também comprimidas ou moldadas sob calor e pressão para produção de painéis e produtos moldados. Desses tratamentos surgiram três produtos o *impreg*, *compreg* e o *staypak*.

O *impreg* consiste em impregnar a madeira com resina fenólica que penetra e polimeriza dentro dos espaços vazios na parede celular. Dessa forma a tendência da madeira em inchar e contrair é permanentemente reduzida (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). O *compreg* e o *staypak* são processos que usam pressão para densificar a madeira e melhorar suas propriedades. A compressão da madeira sólida foi estudada primeiramente na Alemanha no século passado e esse produto foi chamado de

Lignostone, que era menos estável dimensionalmente que o *staypak*. Outro produto similar também surgido na Alemanha era feito de madeira laminada comprimida conhecida como *Lignofol* (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

O *compreg* é parecido com o *impreg* exceto que é comprimido antes da resina endurecer dentro da madeira. A resina, geralmente fenol-formaldeído, atua como um plastificador da madeira que pode então ser comprimida em prensa quente (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Quando a madeira é comprimida ela assume um acabamento brilhante na superfície, que se torna desejável para uso em móveis e pisos. Painéis feitos de lâminas modificadas pelo processo *compreg* foram usados durante a guerra para fabricação de hélices de avião entre outros produtos. Além disso, o *compreg* tem melhores propriedades de resistência do que as fibras de vidro e podem ser sensivelmente mais baratas (STAMM; CHIDESTER, 1947).

Entretanto, os estudos demonstraram que tratamentos com resinas podem deixar a parede celular mais frágil (STAMM; CHIDESTER, 1947; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010), dificultando a grande utilização do *impreg* e do *compreg*. Apostou-se apenas na densificação a partir da compressão mecânica que pode aumentar a densidade da madeira e melhorar sua resistência. Porém a madeira sólida e lâminas não tratadas com resina quando comprimidas tendem a retornar à sua dimensão inicial quando expostas a umidade. Esse efeito é chamado de *springback* ou retorno em espessura e ao contrário do inchamento natural da madeira, não é reversível (KULTIKOVA, 1999).

Nesse sentido foi pensado em um produto mais denso, mas que tivesse menores tensões de compressão, reduzindo o efeito *springback*. Então foi desenvolvido o *staypak*, que consiste em comprimir a madeira sob condições que causam suficiente fluidez da lignina e assim permite a liberação das tensões internas de compressão (SEBORG; MILLETT; STAMM, 1956). A madeira é comprimida em condições de umidade igual a do uso final e temperaturas entre 150 °C a 180 °C (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; KULTIKOVA, 1999).

O *staypak* não é tão resistente à água como o *compreg*, mas é duas vezes mais resistente ao impacto e a sua resistência à tração e à flexão são aproximadamente 25 vezes maior que o *compreg* (SEBORG; MILLETT; STAMM, 1956). O acabamento natural do *staypak* é quase tão bom quanto o do *compreg*. Em condições de intemperismo, no entanto, é definitivamente inferior ao *compreg* (STAMM; CHIDESTER, 1947).

Com o passar dos anos, os estudos com densificação da madeira não foram interrompidos e recentemente têm-se dado bastante atenção a esse assunto. Encontram-se na literatura processos de densificação que utilizam apenas processos mecânicos e aqueles que utilizam uma combinação do processo mecânico com o calor. Estes são chamados de tratamentos termomecânicos.

Utilizando apenas o processo mecânico para densificação, Blomberg e Persson (2004) patentearam um processo de densificação baseado em uma compressão semi-isostática, chamando o produto de *CaLignum*. Esse processo usa uma prensa especial em que uma membrana de borracha preenchida com óleo é pressionada contra a madeira apoiada no prato de metal da prensa. Segundo Kutnar e Sernek (2007) esse processo deixa a madeira com uma forma irregular, mas com uma densidade homogênea. Não é usado calor no processo, mas os desenvolvedores dessa técnica garantem uma compressão da madeira sem rachaduras.

Mais recentemente, Bekhta, Hiziroglu e Shepelyuk (2009) estudaram a compressão mecânica de lâminas também sem calor, por meio de um rolo compressor. Os autores densificaram as lâminas passando o rolo compressor no sentidos paralelo e perpendicular à grã e confeccionaram compensados com as lâminas tratadas e não tratadas. As lâminas densificadas alcançaram valores de resistência mecânica semelhantes aos encontrados em madeiras sólidas. Além disso, quando a taxa de compressão foi aumentada até 15% houve redução na quantidade de adesivo usada para confecção do compensado.

Com relação aos tratamentos termomecânicos que usam calor, pressão e umidade são usados principalmente dois tipos de tratamento termomecânicos: o termohidromecânico e o termohigromecânico. Ambos usam a umidade como forma de prover o amolecimento dos polímeros rígidos da madeira e comprimir a madeira com o mínimo de rachaduras e colapso celular (KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975). O tratamento termohidromecânico utiliza a água durante o processo de compressão e o termohigromecânico usa vapor no lugar da água.

Cloutier, Fang e Mariotti (2008) estudaram a densificação por meio do tratamento termohigromecânico ou THM, como chamado pelos autores. O THM consiste em pré-tratar a madeira com vapor quente e em seguida aplicar pressão, reduzindo a sua espessura em 50%. A pressão e o vapor são mantidos após a densificação constituindo um pós-tratamento. O tempo total do tratamento dura entre 15 e 55 minutos. Após a densificação os autores verificaram que a densidade das lâminas

de Aspen (*Populus tremuloides*) aumentou em 147% usando a temperatura de 200 °C. A 220 °C e 240 °C a densificação ocorreu, mas em nível menor, devido a maior degradação dos componentes da parede celular.

O THM, segundo Cloutier, Fang e Mariotti (2008), também proporcionou uma redução do TUE devido a redução da porosidade e da higroscopicidade da parede celular. O MOE das lâminas tratadas a 200 °C foi aproximadamente duas vezes maior em relação as não tratadas, decrescendo com o aumento de temperatura. O mesmo comportamento foi observado para o MOR.

Kamke e Sizemore (2005) patentearam um tratamento termomecânico da madeira chamado de VTC (*Viscoelastic Thermal Compression*). Segundo Kutnar e Sernek (2007) esse processo é capaz de aumentar a densidade da madeira entre 100% e 300%. A compressão é feita em um sistema de vapor a alta pressão. Essa condição impede que as células da parede celular sofram fraturas durante a compressão.

O processo VTC envolve primeiro um aquecimento e um acondicionamento da madeira a alta temperatura e umidade para que os polímeros atinjam o ponto de transição vítrea (amolecimento da madeira). Em seguida ocorre uma rápida retirada de vapor e da água presente nas paredes celulares. O passo seguinte é a compressão perpendicular à grã enquanto a madeira ainda está no estado viscoso. Depois da compressão, a madeira é reaquecida para a liberação das tensões de compressão e a degradação dos polímeros higroscópicos. A última etapa do VTC é o resfriamento da madeira para abaixo da temperatura de transição vítrea e o aumento do seu teor de umidade, condicionando a madeira em temperatura e umidade relativa ambiente (KAMKE; SIZEMORE, 2005).

Welzbacher *et al.* (2008) desenvolveram um tratamento termomecânico sem a utilização de umidade durante o processo de densificação usando apenas calor provido pelo contato da madeira com os pratos de metal da prensa. Os autores testaram esse tratamento em escala laboratorial e em escala industrial. Em escala laboratorial, os autores, usaram madeira sólida de Spruce (*Picea abies*) e temperaturas entre 140 °C e 200 °C variando o tempo entre 30 minutos e 240 minutos.

Em escala industrial foi utilizada a temperatura de 160 °C, pressão de 5,0 N/mm² aplicada na velocidade de 1 mm/min até a espessura das amostras ser reduzida de 46 mm para 24 mm. A pressão foi aplicada por 30 minutos e depois reduzida para 0,5 N/mm² até o resfriamento do material a 80 °C. Tanto na escala laboratorial quanto na industrial, após a compressão, foi aplicado um tratamento térmico com óleo quente

(*Oil-Heat Treatment*, OHT) para relaxar as tensões internas de compressão e degradar os polímeros higroscópicos da madeira.

Na maioria dos estudos existe essa preocupação de manter a estabilidade dimensional do produto densificado por meio da diminuição da liberação das tensões de compressão. O método mais simples e mais barato de melhorar a estabilidade dimensional da madeira até agora encontrado é aquecer a madeira em condições amenas, que evitem a carbonização (STAMM; BURR; KLINE, 1946; STAMM; CHIDESTER, 1947). Esses tratamentos térmicos podem ser caracterizados como pós-tratamentos e geralmente usa-se vapor d'água saturado (CLOUTIER; FANG; MARIOTTI, 2008; HEGER *et al.*, 2004), óleo quente (WELZBACHER *et al.*, 2008) ou simplesmente calor por contato em prensa quente (DEL MENEZZI; TOMASELLI, 2006) e serão abordados mais detalhadamente no tópico “Efeito da compressão sobre as propriedades da madeira”.

Outros tratamentos semelhantes estão sendo estudados, tanto para madeira sólida quanto para lâminas de madeira. O indispensável nesses tratamentos é conseguir com que a madeira seja comprimida 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. O comportamento desses polímeros sob essas condições será abordado no tópico seguinte.

2.3.2 Polímeros amorfos da madeira

De modo geral, os polímeros da madeira são termoplásticos, ou seja, quando são aquecidos se tornam viscosos e endurecem quando são resfriados, caracterizando processos reversíveis e que podem ser repetidos. Oferecem muitas vantagens em relação aos materiais tradicionais: baixa densidade, baixo gasto energético de produção, baixo custo de processamento e têm a habilidade de tomar formas complexas com relativa facilidade (FURNESS, 2001).

Podem apresentar-se de duas formas: semicristalinos ou amorfos, dependendo do seu arranjo molecular. Os semicristalinos possuem um arranjo ordenado e regular em determinadas regiões. Devido às fortes interações intermoleculares, os polímeros semicristalinos são mais duros e resistentes e como as regiões cristalinas espalham a luz, estes polímeros são mais opacos (REVISTA ELETRÔNICA DO

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA DA UFSC, 2011). A celulose existente na madeira é um exemplo desse tipo de polímero (MORSING, 2000).

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). 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; SERNEK, 2007; WOLCOTT; KAMKE; DILLARD, 1990).

A estrutura não cristalina, heterogênea e de baixo peso molecular da hemicelulose coexiste com a celulose na parede celular, e a celulose e as hemiceluloses 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; PONCSAK; BOLUK, 2008).

Dessa forma, removendo as hemiceluloses diminui 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 (KOCAEFE; PONCSAK; BOLUK 2008).

Essa complexidade torna a madeira difícil de ser estudada por ser um material heterogêneo e porque cada polímero tem um comportamento diferente. Morsing (2000) comenta que a técnica de densificação da madeira requer quatro passos básicos: i) plastização 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. A primeira etapa de amolecimento da parede celular é conseguida graças à natureza viscoelástica dos polímeros da madeira.

A parede celular é basicamente composta por um polímero rígido, a celulose, e uma matriz de lignina e hemicelulose. Em temperatura ambiente, esses polímeros permanecem em estado vítreo (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Entre as condições da fase vítrea e da fase elástica, o polímero encontra-se em uma fase de transição. Nesta região, ocorrem grandes mudanças nas propriedades do polímero,

resultado de pequenas mudanças no tempo, temperatura ou concentração de diluentes (WOLCOTT; KAMKE; DILLARD, 1990).

A temperatura de transição entre a fase vítrea e a fase elástica é chamada de temperatura de transição vítrea (T_g) que é de aproximadamente 170 °C, mas isso varia conforme a espécie e a umidade empregada. Acima da T_g é possível moldar a lignina e com o resfriamento, manter a deformação (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). A Figura 2.2 mostra os estágios vítreo, elástico e viscoso dos polímeros em função do tempo.

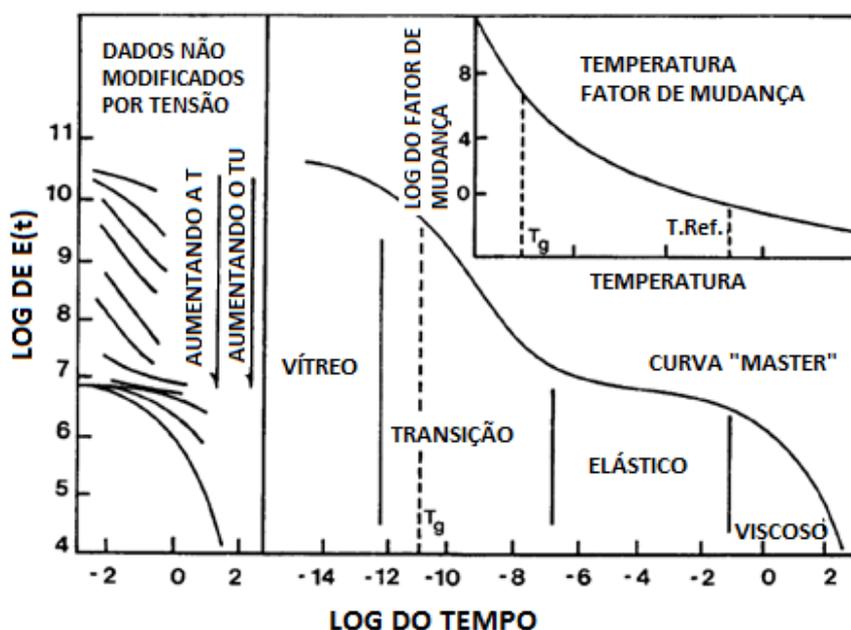


FIGURA 2.2 – Variação do módulo de elasticidade (E) para os polímeros amorfos com o tempo, temperatura e concentração de umidade. A curva “master” denota as regiões do comportamento viscoelástico dos polímeros. Adaptado de Ward (1983) *apud* Wolcott, Kamke e Dillard (1990)

Ainda na Figura 2.2, é possível observar que se os valores da flexibilidade para várias temperaturas forem colocados na escala logarítmica do tempo obtêm-se uma curva denominada “master” a uma temperatura de referência ($T.Ref.$) arbitrária que representa a flexibilidade para várias medições no tempo (GUEDES, 1992).

No canto esquerdo, o gráfico (Figura 2.2) mostra que quando não ocorre tensão sobre os polímeros, o módulo de relaxação é dependente da temperatura (T) e do teor de umidade (TU). Em termos de propriedades mecânicas, Wolcott, Kamke e Dillard (1990)

comentam que uma queda abrupta na rigidez é notada na T_g , diferenciando a região do estado vítreo da região do estado elástico do polímero.

A matriz celular pode ser termoplastificada sozinha pelo calor, mas às vezes a T_g necessária para essa plastização é tão grande que pode ocorrer a degradação das fibras se altas temperaturas são mantidas por um longo período (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; MORSING, 2000). A T_g pode ser reduzida com adição de umidade ou através de plastificantes ou emolientes (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Dessa forma a utilização de tratamentos termomecânicos que utilizam qualquer tipo de umidade são os mais indicados para um amolecimento da madeira sem grande degradação de seus componentes.

Quando a temperatura do polímero aproxima-se da T_g , a rigidez do material diminui rapidamente, o que corresponde a um aumento significativo no movimento molecular (dissipação de energia). Essa dissipação de energia alcança o máximo entre as diferentes transições do polímero, principalmente entre a fase de transição vítrea (ÅKERHOLM; SALMÉN, 2004). Muitas propriedades dos polímeros amorfos, tais como o módulo de elasticidade, mudam drasticamente quando o material entra na fase de transição vítrea (KUTNAR; SERNEK, 2007).

A presença de umidade retarda o aumento de temperatura da madeira, uma vez que uma parte da energia para o aquecimento da madeira é gasta antes com a evaporação da água (KOCAEFE; PONCSAK; BOLUK, 2008). Por isso a presença de umidade pode diminuir a T_g , favorecendo o amolecimento dos polímeros com uma menor degradação. Essa mudança na T_g com a presença de umidade é mostrada na Tabela 2.1. Entretanto, segundo Morsing (2000) a temperatura de degradação térmica dos componentes da madeira não é influenciada pela umidade e a taxa de degradação é 10 vezes maior na presença de vapor d'água durante o aquecimento do que quando a madeira está seca.

TABELA 2.1 – Resumo das temperaturas de transição vítrea e degradação de componentes da madeira na condição seca e úmida.

Componente	T _g , °C		Início da degradação severa, °C	
	Seco	Úmido	Seco	Úmido
Celulose	> 230	> 220	> 200	> 200
Hemicelulose	160-220	< 25	> 160	> 160
Lignina	> 150	60-90	> 160	> 160

T_g = Temperatura de Transição Vítrea. Adaptado de Morsing (2000).

2.3.3 Efeito da compressão sobre as propriedades da madeira

O principal efeito da compressão sobre a madeira é a redução dos espaços vazios entre as células e do lúmen celular (Figura 2.3). Devido ao efeito do calor sobre os polímeros viscoelásticos da madeira, como já comentado, a deformação da parede celular ocorre sem fraturas, os vasos achatam e os raios ficam curvados (KUTNAR; KAMKE; SERNEK, 2009). A compressão da madeira sem o colapso celular é o fator mais importante no aumento das propriedades mecânicas e físicas do material densificado (KULTIKOVA, 1999).

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 termomecânicamente modificadas é a quantidade e o tipo de células que entraram em colapso (KULTIKOVA, 1999).

Segundo Wolcott, Kamke e Dillard (1990), 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 2.4 mostra os tipos de colapso que podem ocorrer na madeira quando esta estiver sob compressão.

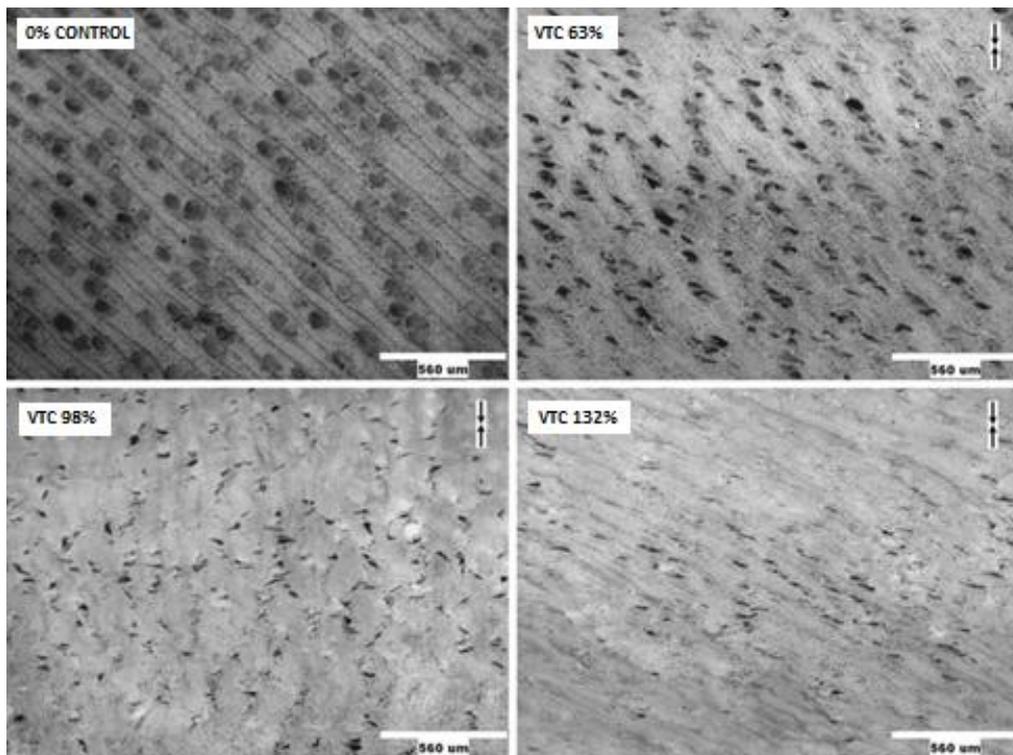


FIGURA 2.3 – Fotomicrografia da amostra controle e das amostras que passaram pelo tratamento termomecânico em diferentes níveis de densificação (63%, 98% e 132%). A compressão foi feita na direção vertical como mostra as setas (KUTNAR; KAMKE; SERNEK, 2009).

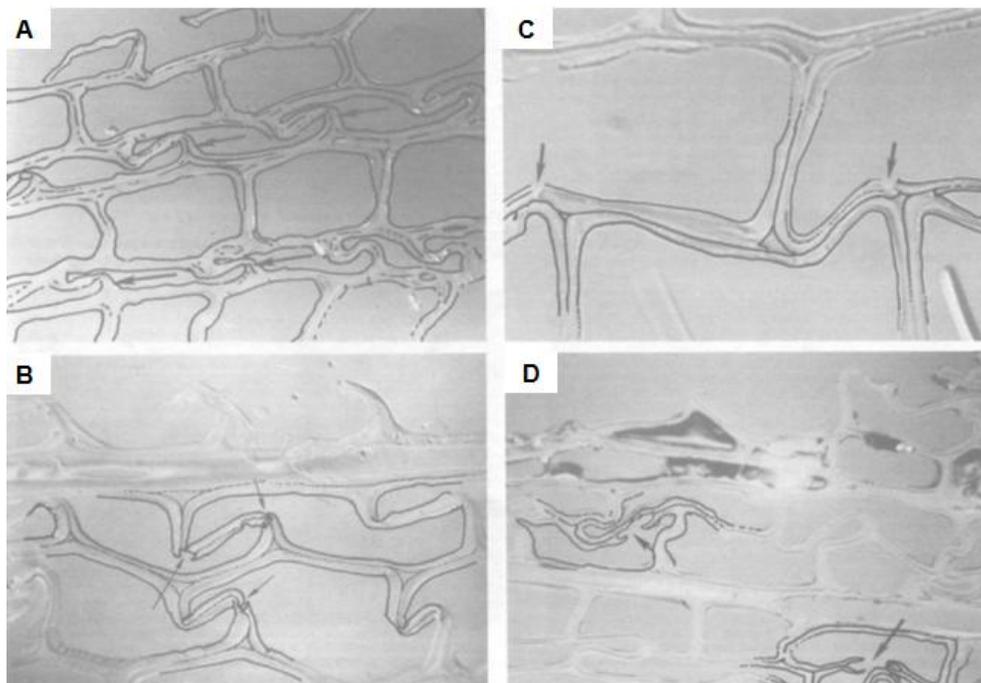


FIGURA 2.4 – Falhas nas paredes celulares de Douglas-fir (*Pseudotsuga* sp.) por compressão quente. A) Flambagem das paredes. B) Ruptura por extrema flexão. C) Falha na parede primária e secundária por flexão extrema. D) Falha na parede secundária formando buracos (GEIMER *et al.*, 1985).

Os tipos de colapso variam entre diferentes espécies e também entre o lenho inicial e tardio. No *Pinus taeda* a diferença na resistência a compressão entre o lenho inicial e tardio, combinada pela mudança abrupta de densidade entre essas zonas causam uma maior ruptura nos traqueídes do lenho inicial (KULTIKOVA, 1999). Kutnar, Kamke e Sernek (2009) e Heger *et al.* (2004) comentam que as células do lenho inicial nas coníferas possuem um lúmen largo com uma parede celular fina e por isso o lenho inicial deforma mais facilmente que o tardio durante a compressão. Então espécies com maior quantidade de lenho inicial vão sofrer mais deformação que as demais.

As modificações do tratamento termomecânico podem ser vistas na superfície da madeira. A compressão concomitante com o calor torna a superfície mais lisa, diminuindo a rugosidade da madeira. Candan, Hiziroglu e McDonald (2010) e Bekhta, Niemz e Sedliacik (2012) comentam que a rugosidade de lâminas tratadas termomecanicamente é função principalmente da temperatura e da pressão de compressão. Os autores usaram temperaturas de aquecimento entre 100 °C e 210 °C e pressões entre 1,0 e 9,0 N/mm². Nos dois estudos foi observada uma redução da rugosidade à medida que aumentou a temperatura e a pressão.

Os autores 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 Bekhta, Niemz e Sedliacik (2012) 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 de prensagem e com o teor de umidade das lâminas.

Inoue *et al.* (1993) comentam a relação existente entre a densidade básica e a taxa de compressão. No estudo desses autores, a densidade 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 densidade aumentou para 0,9 g/cm³, mais que duas vezes que a densidade inicial.

O principal efeito negativo da compressão 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 (HEGER *et al.*, 2004). 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).

A Figura 2.5 mostra que uma peça comprimida com espessura E_d 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 (IE_t). O inchamento higroscópico (IE_h), no entanto, é reversível e quando a madeira perde água a espessura do material tende a retornar à espessura E_d . Porém, o inchamento resultante das tensões de compressão (IE_{tc}) é irreversível e modifica permanentemente a forma da madeira (E_f). Esse inchamento também é chamado de taxa de não retorno em espessura (TNRE) e representa uma importante medida da estabilidade dimensional.

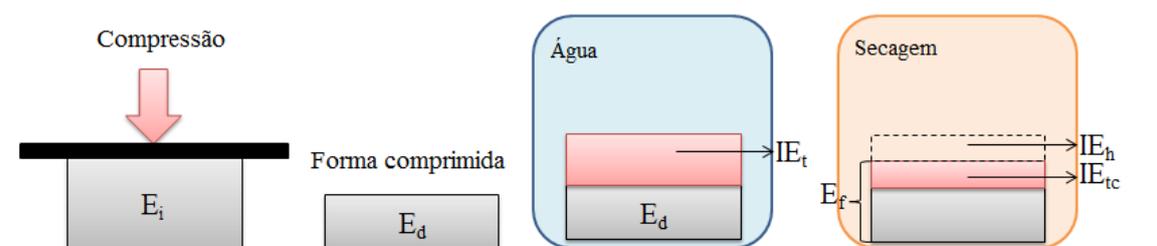


FIGURA 2.5 – Esquema do inchamento em espessura de madeiras comprimidas, onde E_i , E_d e E_f representam as espessuras inicial, depois da compressão e final, respectivamente e IE_t , IE_h e IE_{tc} representam os inchamentos em espessura total, higroscópico e de tensão de compressão.

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 sejam liberadas lentamente e assim fixar a forma final sem prejudicar o material.

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 na presença de vapor. 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 do vapor tem 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; SIZEMORE, 2005).

Welzbacher *et al.* (2008) depois do tratamento termomecânico por contato em prensa aquecida, aplicaram um pós-tratamento OHT nas temperaturas de 180 °C a 220 °C por duas e quatro horas. Segundo os autores o inchamento em espessura total foi significativamente reduzido pelo OHT aplicado em escala laboratorial. A TNRE foi reduzida para menos de 5% enquanto que nas amostras não tratadas com o OHT a TNRE foi de 15%. Além disso, o tratamento em escala industrial permitiu que amostras submetidas ao intemperismo natural conservassem a forma comprimida com baixo inchamento mesmo após 30 meses.

Mesmo com esse efeito negativo causado pela compressão, o aumento de densidade consegue ser o efeito mais influente nas propriedades físicas e mecânicas das madeiras tratadas termomecanicamente. Welzbacher *et al.* (2008) conseguiram aumentar a densidade de *Picea abies* Karst de 0,42 g/cm³ para 0,74 g/cm³ tratando as peças termomecanicamente a 200 °C por 4 horas. Heger *et al.* (2004) observaram o fechamento dos lumens de Spruce (*Picea* sp.) e o aumento da densidade de 0,45 g/cm³ para 1,28 g/cm³ quando as amostras foram densificadas no sentido radial, em reator sob vapor saturado.

No estudo de Narayanamurti e Kaul (1966) as propriedades mecânicas foram melhoradas com o aumento da taxa de compressão e densidade básica. O MOE na tração e na flexão das madeiras termomecanicamente tratadas a 200 °C foi quase duas vezes maior que as não tratadas, segundo o estudo de Cloutier, Fang e Mariotti (2008). Esse valor só diminuiu para as madeiras tratadas em 220 °C e 240 °C.

O mesmo comportamento pôde ser observado para o MOR na tração e flexão, mas esse aumento foi mais importante para a flexão do que para a tração. A dureza

também aumentou, passou de 17 N/mm² nas madeiras não tratadas para 45 N/mm² para as madeiras tratadas a 200 °C. A dureza só caiu nas tratadas em 220 °C e 240 °C, provavelmente devido a maior degradação dos polímeros da parede celular.

A densificação por compressão também é uma oportunidade para que madeiras leves e porosas tornem-se mais densas e possam ser substitutas das madeiras mais pesadas valorizadas pelo mercado, diversificando as espécies usadas na construção civil. Da mesma forma a compressão pode aumentar ainda mais a resistência das madeiras densas, melhorando seu desempenho e adicionando valor agregado. Produtos densificados de madeira podem ser competitivos para lugares onde geralmente a madeira é considerada um produto pouco resistente, como por exemplo, em estruturas onde são requeridas resistência, rigidez e durabilidade (KUTNAR; SERNEK, 2007).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 A ESPÉCIE *TRATTINNICKIA BURSERAEFOLIA* (MART.) WILLD.

A espécie utilizada nesse trabalho foi a *Trattinnickia burseraefolia* cujos nomes populares mais comuns são amescla, amesclão, breu-sucuúba, breu-preto, mescla e mangue (IBAMA, 2001; INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL, 2009). Pertence à família das Burseráceas, constituída por 21 gêneros e mais de 600 espécies. O gênero mais rico e mais abundante dessa família na Amazônia é o *Protium* na qual estão as espécies conhecidas popularmente como breu (ZOGHBI *et al.*, 1993).

A amescla é encontrada em matas de transição e na floresta ombrófila densa nos estados brasileiros do Pará, Amazonas, Acre, Mato-Grosso, Roraima e Maranhão (MADGUIMARÃES, 2012; INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL, 2009). Possui tronco retilíneo e alto com altura comercial média de 9,0 metros e diâmetro a altura do peito (DAP) médio de 40 cm. A madeira é de cor branca, variando para o marrom-claro, cerne e alburno são poucos distintos e os anéis de crescimento são distintos (IBAMA, 2001).

A trabalhabilidade da amescla é boa, sendo fácil de serrar e aplainar, porém apresenta-se áspera na superfície radial, devido à grã cruzada irregular. A madeira é considerada leve, com massa específica aparente de 0,52 g/cm³ a 15% de umidade. Juntamente com o axixá (*Sterculia* sp.), bandarra (*Cedrelinga catenaeformis* Ducke),

copaíba (*Copaifera* sp.), sumaúma (*Ceiba pentandra*) e tauari (*Couratari* sp.) são usadas na confecção de lâminas e em 60% dos compensados tropicais produzidos no Brasil, inclusive para a exportação (MATOSKI; ROCHA, 2006).

3.2 OBTENÇÃO DAS LÂMINAS

As lâminas foram doadas pela empresa Madeiranit Madeiras Ltda., localizada no município de Sinop, Mato Grosso. Antes da laminação as toras passaram por um processo de cozimento a vapor, onde ficaram cobertas com lonas por 72 horas e temperatura máxima de 120 °C. Depois do cozimento, as toras seguiram para um torno laminador com garras telescópicas, onde a tora foi presa e desenrolada pela rotação dos eixos telescópicos contra a faca do torno. A Figura 3.1 mostra a sequência de produção das lâminas.

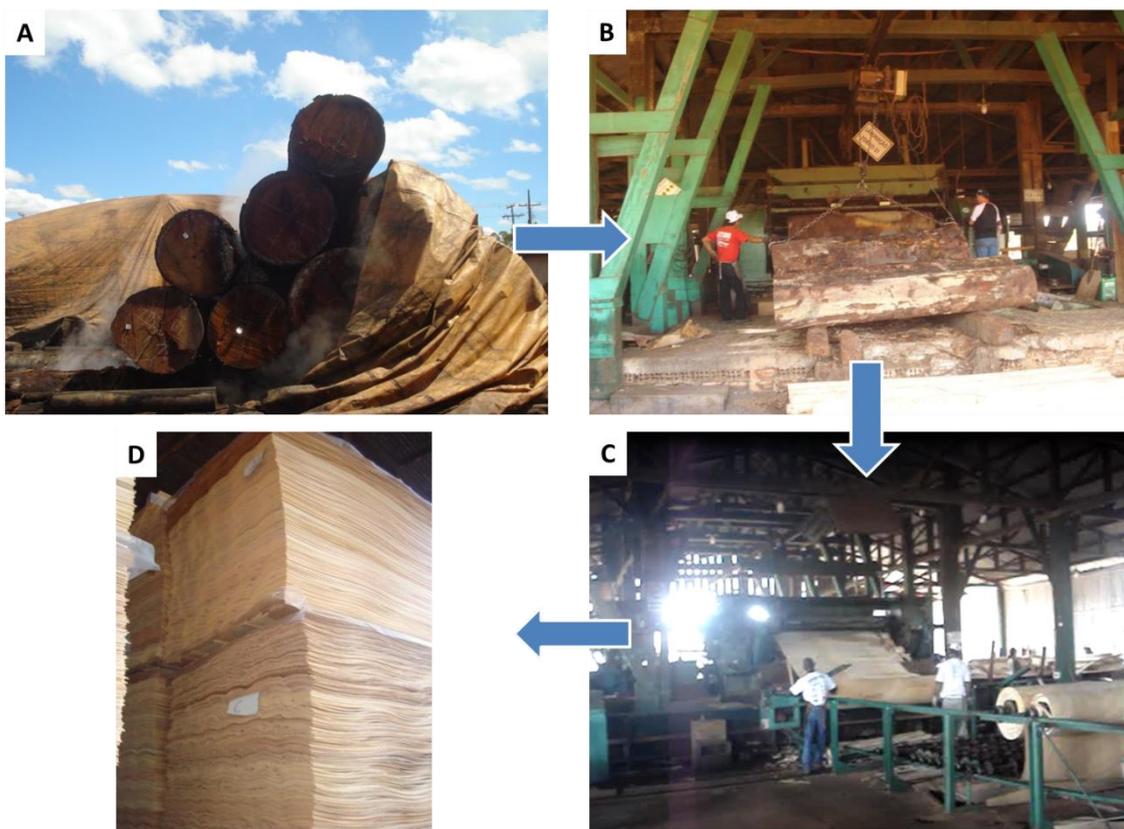


FIGURA 3.1 – Sequência de produção das lâminas. A) toras de amescla durante o cozimento. B) toras entrando no torno desenrolador. C) saída das lâminas do torno. D) lâminas separadas por qualidade.

Durante o processo de laminação no torno desenrolador é comum o aparecimento das “fendas de laminação” causadas pela pressão da faca contra a parte interior da lâmina (SUCHSLAND; JANKOWSKY, 1978) (Figura 3.2). A lâmina fica visivelmente mais “frouxa” em uma de suas faces. Nesse estudo, os resultados de rugosidade e molhabilidade serão apresentados para o lado “sem fendas” e o lado “com fendas”.

Foram selecionadas lâminas de primeira qualidade, sem defeitos e sem manchas causadas por fungos. Foram trazidas nove lâminas de 500 mm x 500 mm x 3,5 mm e 34 lâminas com 700 mm x 700 mm x 1,5 mm. O material foi levado para confirmação da espécie na Xiloteca do Laboratório de Produtos Florestais (FPBw) em Brasília.

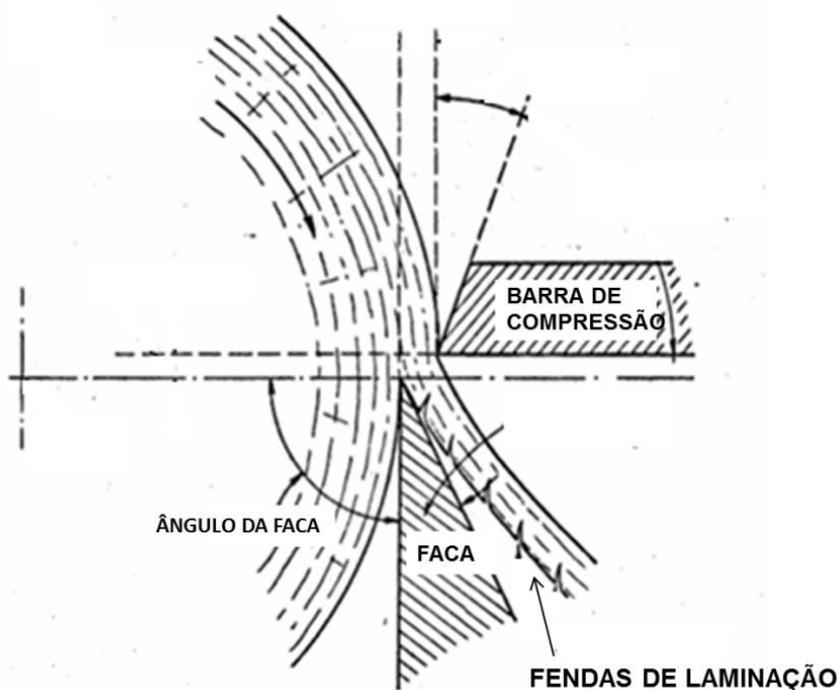


FIGURA 3.2 – Esquema da laminação no torno desenrolador e o aparecimento das fendas de laminação (SUCHSLAND; JANKOWSKY, 1978).

CAPÍTULO 2

EFEITO DO TRATAMENTO TERMOMECÂNICO SOBRE PROPRIEDADES FÍSICAS E COLORIMÉTRICAS DE LÂMINAS DE AMESCLA (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.)

1 INTRODUÇÃO

O tratamento termomecânico é uma forma de densificação da madeira que combina a temperatura do tratamento térmico com a compressão mecânica. A madeira torna-se mais densa, pois a redução da espessura diminui os espaços vazios e reduz o volume. Porém isso deve acontecer com o menor número de fraturas na parede celular possível a fim de manter as propriedades mecânicas do material.

Vários autores (ÅKERHOLM; SALMÉN, 2004; FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; MORSING, 2000; WOLCOTT; KAMKE; DILLARD, 1990) comentam sobre a temperatura ideal em que a matriz polimérica da madeira passa do estado vítreo para o estado elástico, permitindo que a compressão celular ocorra sem fraturas. Essa temperatura varia entre as espécies, mas segundo o Forest Products Laboratory (2010) é de aproximadamente 170 °C.

Os estudos usando tratamentos termomecânicos com lâminas de madeira são recentes. Dentre outros, pode-se destacar os estudos de Bekhta e Marutzky (2007), Cloutier, Fang e Mariotti (2008), Candan, Hiziroglu e McDonald (2010), Kurowska *et al.* (2010), Arruda *et al.* (2011), Bekhta, Niemz e Sedliacik (2012) e Fang *et al.* (2012). Nesses estudos, os autores variaram entre temperaturas amenas, de 100 °C a 105 °C, intermediárias, de 150 °C a 180 °C, e altas, de 200 °C e 240 °C. Essas temperaturas são semelhantes às usadas em tratamentos com madeiras sólidas, porém o tempo para o tratamento com lâminas é reduzido, variando entre 30 s e 15 minutos.

Além da temperatura e do tempo, a pressão é uma variável importante no tratamento termomecânico. O aumento da pressão está relacionado com o aumento da taxa de compressão, que mede o grau da densificação da madeira (BEKHTA, NIEMZ; SEDLIACIK, 2012). Pressão e temperatura juntas foram responsáveis pela redução da rugosidade das lâminas, de acordo com os trabalhos de Bekhta e Marutzky (2007) e Bekhta, Niemz e Sedliacik, (2012).

Acerca disso, esse capítulo tem como objetivo analisar a influência do tratamento termomecânico nas propriedades físicas e colorimétricas de lâminas de amescla (*Trattinnickia burseraefolia*), observando especificamente a estabilidade dimensional, a higroscopicidade e a qualidade da superfície.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As lâminas de amescla (*Trattinnickia burseraefolia*) foram doadas pela empresa Madeiranit Madeiras Ltda., localizada no município de Sinop – MT. As lâminas foram obtidas por desenrolamento em torno laminador, secas em estufa e separadas por qualidade. Para esse estudo foram utilizadas as lâminas de qualidade tipo exportação.

As lâminas foram esquadrejadas nas dimensões de 250 mm x 250 mm e em seguida foram levadas para climatização ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $65\% \pm 1\%$ de umidade relativa) onde foram mantidas até atingirem massa constante. De cada lâmina foi retirada uma amostra no tamanho de 40 mm x 40 mm (Figura 2.1) para facilitar a realização de alguns ensaios.

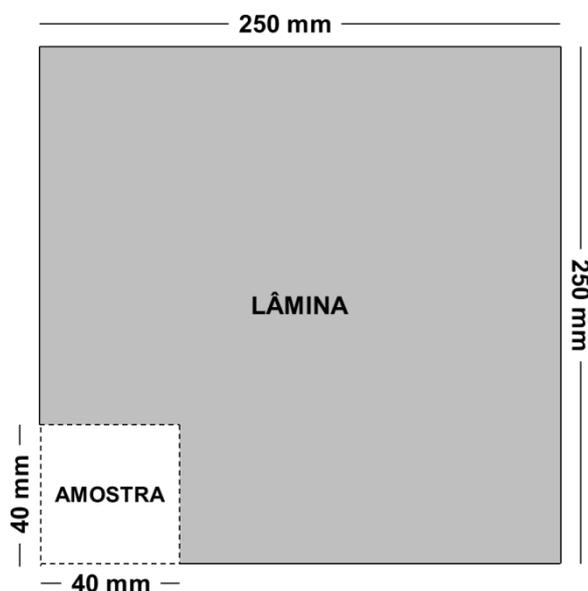


FIGURA 2.1 – Esquema do tamanho da lâmina e da amostra retirada para caracterização.

As lâminas foram numeradas em sequência e distribuídas sistematicamente em cinco blocos de 30 lâminas cada. A distribuição ocorreu da seguinte forma: lâmina n° 1

– testemunha; lâmina n° 2 – tratamento 1; lâmina n° 3 – tratamento 2 e assim por diante. A sistematização foi baseada na densidade aparente das amostras para que não houvesse diferença significativa entre as densidades dos tratamentos. Após a distribuição foi feita uma Análise de Variância fator único a 5% de significância para identificar a existência de diferença entre os blocos de lâminas. Caso houvesse diferença significativa, outra forma de sistematização seria adotada e a ANOVA seria refeita. Porém, como a ANOVA não identificou diferença entre os blocos das lâminas (sig. = 0,95), essa distribuição foi mantida.

2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A densidade aparente foi calculada pela determinação do volume por mensuração, de acordo com a norma ASTM D2395 (2007). Foram medidos 30 corpos-de-prova (CPs) de 40 mm x 40 mm de cada tratamento. Em cada, foram feitas três medidas em cada lado da amostra com um paquímetro digital e a espessura foi medida em cinco pontos com um relógio comparador digital.

A molhabilidade das amostras foi testada em um medidor de ângulo de contato (AC) Krüss modelo DSA30 com o software DSA3 instalado. Esse equipamento mede o AC entre um líquido depositado sobre um sólido ou entre um líquido e um gás. As imagens foram captadas por uma câmara e analisadas pelo software que fez uma média entre os ângulos da direita e da esquerda.

Para medição do AC, foram usados 10 CPs de cada tratamento medindo 40 mm x 40 mm. Foi depositada no centro de cada amostra uma gota de água destilada de 10 μ l e o AC foi medido uma vez a cada segundo durante 120 segundos. A molhabilidade foi testada nos dois lados da amostra para verificar diferenças na molhabilidade causadas pelas fendas de laminação.

A medição da rugosidade foi feita em um rugosímetro Mitutoyo SurfTest modelo SJ-301 acoplado a um computador com o software instalado. Da mesma forma como no goniômetro, a rugosidade foi medida no centro e em cada face da lâmina e foram usados 10 CPs de cada tratamento medindo 40 mm x 40 mm. Foram medidos três parâmetros no rugosímetro: R_a , R_z e R_t .

O R_a é a média aritmética dos valores absolutos dos desvios do perfil; o R_z é a soma da altura média dos cinco picos mais altos do perfil e a profundidade dos cinco vales mais profundos do perfil medidos de uma linha paralela à linha média; e o R_t é a

soma da altura do pico máximo do perfil e a profundidade do vale máximo do perfil sobre a extensão avaliada. Os parâmetros R_a , R_z e R_t foram obtidos de acordo com as equações 2.1, 2.2 e 2.3, respectivamente (MITUTOYO CORPORATION, 2004).

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (2.1)$$

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Y_{p_i} + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Y_{v_i} \quad (2.2)$$

$$R_t = Y_p + Y_v \quad (2.3)$$

Onde:

Y_i = desvios do perfil;

Y_{p_i} ; Y_{v_i} = picos mais altos e vales mais profundos;

Y_p ; Y_v = pico mais alto e vale mais profundo.

Para avaliar a estabilidade dimensional das lâminas, foi feito o inchamento em espessura (IE, %) e absorção de água (AB, %) em duas e 24 horas e o teor de umidade de equilíbrio (TUE). Para esses ensaios foram utilizados 10 CPs de cada tratamento medindo 40 mm x 40 mm cada. O IE e a AB foram obtidos de acordo com a norma ASTM D1037 (2006) e o TUE foi feito em estufa à temperatura constante de $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ de acordo com a norma ASTM D4442 (2007).

Ainda foram avaliadas a perda de massa (PM, %) e a taxa de compressão (TC, %), medidas nas 30 lâminas tratadas de 250 mm x 250 mm de cada tratamento. A PM é a relação entre a massa antes do tratamento e a massa após o tratamento (Equação 2.4). 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. 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.

A TC representa o grau de densificação do material, relacionando a espessura final com a espessura inicial da amostra (Equação 2.5). Quanto maior é a TC maior é o grau de densificação do material. A PM e a TC foram medidas em dois momentos: imediatamente após o tratamento (PM e TC imediatas) e após a climatização (PM e TC definitivas).

$$PM = \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \right) \times 100 \quad (2.4)$$

$$TC = \left(\frac{E_i - E_f}{E_i} \right) \times 100 \quad (2.5)$$

Onde:

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

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

2.2 CARACTERIZAÇÃO COLORIMÉTRICA

Para a análise colorimétrica foi usado o sistema CIELab de 1976 e os parâmetros definidos nesse sistema (L^* , a^* , b^* , C e h^*) foram obtidos em um espectrofotômetro X-Rite, modelo Color Eye XTH-X, iluminante D65 e ângulo de 10° em temperatura ambiente, acoplado a um microcomputador. Foram usados 10 CPs de 40 mm x 40 mm para cada tratamento e em cada CP foram feitas quatro medições, sendo duas de cada lado. A partir da média dos parâmetros a cor da madeira não tratada foi determinada utilizando-se a tabela de cores sugerida por Camargos e Gonzalez (2001).

O parâmetro L^* representa a claridade e varia de 0 (preto absoluto) a 100 (branco total). A coordenada a^* varia entre as cores verde ($-a^*$) e vermelho ($+a^*$). A coordenada b^* varia do azul ($-b^*$) ao amarelo ($+b^*$). O parâmetro h^* (ângulo de tinta) é dado em graus e é derivado dos valores de a^* e b^* , que variam de 0 a 60 e não têm unidade. E o parâmetro C (saturação) é o desvio a partir do ponto correspondente ao cinza no eixo L^* , ou seja, quanto mais distante do eixo mais saturada será a cor.

Foi usada a equação 2.6 para quantificar a variação da cor (ΔE) nas amostras. Para isso foi medida a variação das coordenadas L^* , a^* e b^* .

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (2.6)$$

Onde:

$\Delta L = L^*$ final – L^* inicial;

$\Delta a = a^*$ final – a^* inicial;

$\Delta b = b^*$ final – b^* inicial.

2.3 TRATAMENTO TERMOMECÂNICO

Para determinar a temperatura, pressão e tempo do tratamento termomecânico foi realizado um pré-teste com 22 lâminas. Para esse pré-teste foram testadas temperaturas de 140 °C, 160 °C, 180 °C e 190 °C, tempos de 0,5, 1,0, 2,0, 3,0 e 6,0 minutos e pressões de 4,0 N/mm², 2,7 N/mm² e 1,35 N/mm². Essas pressões são respectivamente 75%, 50% e 25% da resistência à compressão perpendicular ($f_{c,90^\circ}$) da madeira de amescla, que é igual a 5,39 N/mm² (IBAMA, 2001).

Para tratar as lâminas foi utilizada uma prensa hidráulica INDUMEC com aquecimento por resistência elétrica e área de prensagem máxima de 2500 cm². Depois do pré-teste foram escolhidos quatro tratamentos que apresentaram os melhores resultados em relação à densidade, PM, TC e no aspecto visual. Os tratamentos em que foram usados 190 °C e 4,0 N/mm² foram os que apresentaram os maiores valores para essas propriedades, mas as lâminas ficaram frágeis e com a superfície muito brilhante, o que poderia ser um indicativo de inativação da superfície. Esses tratamentos foram então descartados.

Os tratamentos que utilizaram a pressão de 1,35 N/mm² apresentaram valores muito baixos de densidade e TC em comparação com os tratamentos de 2,7 N/mm² e por isso também foram descartados. Os tempos maiores que dois minutos prejudicaram o aspecto visual da lâmina que ficou muito escura e frágil e também foram descartados. Os tratamentos com a temperatura de 160 °C apresentaram valores intermediários, próximos dos de 180°C, e por isso optou-se por usar valores de temperaturas mais distantes entre si, como 140 °C e 180 °C. Os parâmetros escolhidos para o tratamento termomecânico estão resumidos na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Delineamento experimental do tratamento termomecânico.

Tratamento	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Pressão (N/mm ²)	Nº de lâminas
TESTEMUNHA	-	-	-	30
1	140	1,0	2,7	30
2	140	2,0	2,7	30
3	180	1,0	2,7	30
4	180	2,0	2,7	30

2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A densidade, os parâmetros de rugosidade, o ângulo de contato e os parâmetros colorimétricos foram analisados pelo teste t pareado, a 5% de significância, que comparou as medidas feitas depois do tratamento com as medidas feitas antes, para a mesma amostra. Esse teste foi utilizado para identificar possíveis mudanças significativas na propriedade analisada, causada pelo tratamento termomecânico. O IE, a AB e o TUE foram analisados por uma ANOVA fator único com teste post-hoc de Dunnett, a 5% de significância, que comparou as médias das amostras tratadas com a média das amostras testemunha, par a par. As diferenças estatísticas entre os tratamentos para a TC e a PM foram identificadas pelo teste F na ANOVA fator único a 5% de significância.

Para todas as variáveis foi realizada uma Análise de Variância Fatorial com dois fatores (temperatura e tempo) e dois níveis cada (140 °C e 180 °C; um minuto e dois minutos). Essa análise foi usada para identificar o efeito isolado de cada um dos fatores e a interação entre eles de acordo com o modelo abaixo (Equação 2.7). A Tabela 2.2 mostra em resumo o delineamento estatístico usado no trabalho.

$$\gamma_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (2.7)$$

Onde:

μ = média global;

τ_i = efeito do i-ésimo nível do fator A;

β_j = efeito do nível j-ésimo nível do fator B;

$(\tau\beta)_{ij}$ = efeito da interação entre os fatores A e B;

ϵ_{ijk} = erro de cada observação sendo esses erros independentes entre si e com distribuição N de média 0 e variância σ^2 .

TABELA 2.2 – Delineamento estatístico por propriedade para o tratamento termomecânico das lâminas.

Propriedade	Dimensão do CP	Teste estatístico	Repetições por tratamento
Densidade aparente	40 mm x 40 mm	Teste t pareado	10
AC	40 mm x 40 mm	Teste t pareado	10
Rugosidade	40 mm x 40 mm	Teste t pareado	10
IE	40 mm x 40 mm	Teste de Dunnett	10
AB	40 mm x 40 mm	Teste de Dunnett	10
TUE	40 mm x 40 mm	Teste de Dunnett	10
PM	250 mm x 250 mm	Teste F	30
TC	250 mm x 250 mm	Teste F	30
Colorimetria	40 mm x 40 mm	Teste t pareado	10

AC = ângulo de contato; IE = inchamento em espessura; AB = absorção de água; TUE = teor de umidade de equilíbrio; PM = perda de massa; TC = taxa de compressão.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO INICIAL

A Tabela 3.1 mostra os resultados da caracterização inicial das amostras. As lâminas atingiram massa constante em 10 dias na câmara climatizada. O TUE médio foi de 9,22%, variando entre o valor mínimo de 7,04% e máximo de 11,51%. A densidade aparente média foi de 0,52 g/cm³, com o mínimo de 0,41 g/cm³ e máximo de 0,67 g/cm³.

TABELA 3.1 – Características físicas das lâminas de amescla (*Trattinnickia burseraefolia*) antes do tratamento.

Ensaio	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	CV%
TUE ¹ (%)	9,22	7,04	11,51	0,81	8,77
Densidade aparente ² (g/cm ³)	0,51	0,41	0,67	0,06	12,42
Espessura ² (1,5 mm)	1,65	1,03	2,10	0,01	6,77
Espessura ² (3,5 mm)	3,34	3,02	3,67	0,01	3,90

¹ média de 50 amostras. ² média de 150 amostras. CV = Coeficiente de Variação.

As lâminas de 1,5 mm apresentaram uma variação entre 1,03 mm e 2,10 mm, com média em 1,65 mm e as de 3,5 mm variaram entre 3,02 mm e 3,67 mm, com média de 3,34 mm. Isso pode estar relacionado com ajustes do torno desenrolador. De acordo com o Programa Nacional de Qualidade da Madeira (PNQM) da Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2009) a espessura das lâminas pode variar em até 7% da espessura nominal das lâminas. No caso para as lâminas com 1,5 mm, a espessura deveria variar entre 1,39 e 1,6 mm e para as de 3,5 mm a variação deveria ser de 3,25 a 3,7 mm. Observou-se, no entanto que a variação foi maior que o recomendado pela certificação do PNQM.

3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

Observando os parâmetros da rugosidade no lado sem fendas, o teste t pareado identificou que houve mudança significativa apenas nos tratamentos de 180 °C (Figura 3.1). O R_a , que representa a média dos valores absolutos dos desvios do perfil, diminuiu de 11,83 μm para 8,38 μm (29,16% de redução) no tratamento de 180 °C e um minuto e quando o tempo aumentou para dois minutos o R_a diminuiu de 10,39 μm para 6,31 μm (39,27% de redução).

O parâmetro R_z que representa a soma dos cinco picos mais altos e a profundidade dos vales mais profundos teve um comportamento semelhante ao R_a (Figura 3.1). No lado sem fendas, a redução desse parâmetro só foi significativa a partir do tratamento de 180 °C e um minuto cujo valor diminuiu de 67,25 μm para 53,13 μm (21% de redução). Com o aumento do tempo para dois minutos o R_z diminuiu de 68,14 μm para 39,94 μm (41,38% de redução).

O R_t que representa a soma da altura do pico máximo e da profundidade do vale mais profundo do perfil só foi reduzido significativamente no tratamento de 180 °C e dois minutos, cujo valor diminuiu de 98,68 μm para 56,79 μm (42,45% de redução) (Figura 3.1). Embora a análise fatorial (Figura 3.2 e Tabela A.11) tenha mostrado que o aumento do tempo contribuiu significativamente para a redução dos parâmetros de rugosidade no lado sem fendas, isso só pode ser considerado dentro da temperatura de 180 °C, como mostra o resultado do teste t pareado apresentado na Figura 3.1. Esse mesmo teste indica que usando 140 °C o aumento do tempo para dois minutos não causou redução significativa dos parâmetros de rugosidade.

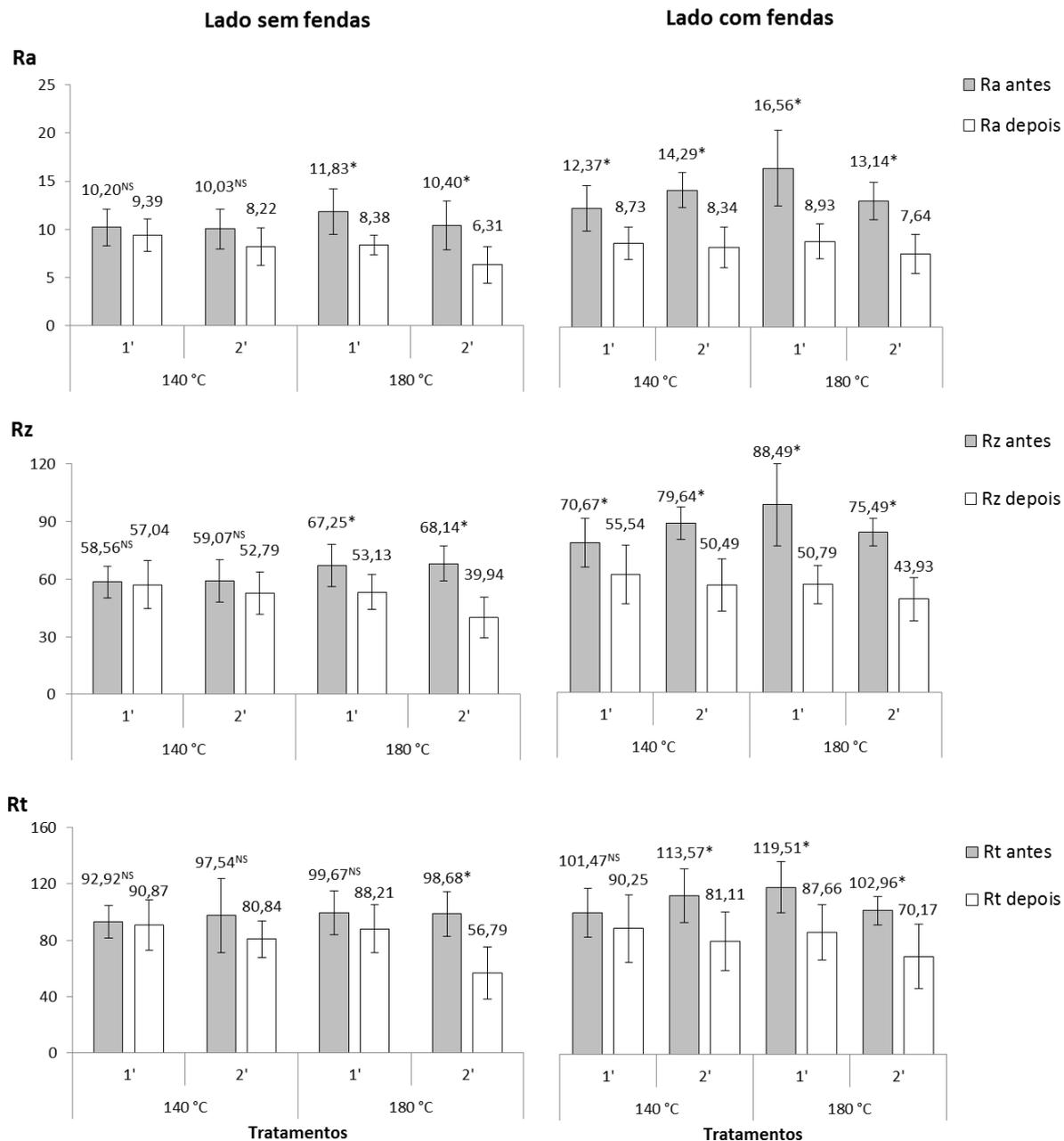


FIGURA 3.1 – Parâmetros de rugosidade medidos antes e depois do tratamento para os dois lados da lâmina.

*.NS diferença significativa e não significativa, respectivamente, entre a condição antes e depois pelo teste t pareado a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Diferentemente do que aconteceu no outro lado, no lado com fendas o teste t pareado identificou que o uso da temperatura de 140 °C provocou mudanças na rugosidade, o que pode ser observado na Figura 3.1. Para os três parâmetros os valores da rugosidade foram significativamente menores depois da aplicação do tratamento termomecânico a partir da temperatura de 140 °C. Em relação ao tempo no lado com

fendas, o aumento para dois minutos não influenciou a redução do R_a e do R_z (Figura 3.2 e Tabela A.11 no anexo). Para esses parâmetros a maior redução ocorreu no tratamento de 180 °C e um minuto, cujo valor passou de 16,56 μm para 8,93 μm (46% de redução) no R_a e de 88,49 μm para 50,79 μm (42,6% de redução) no R_z .

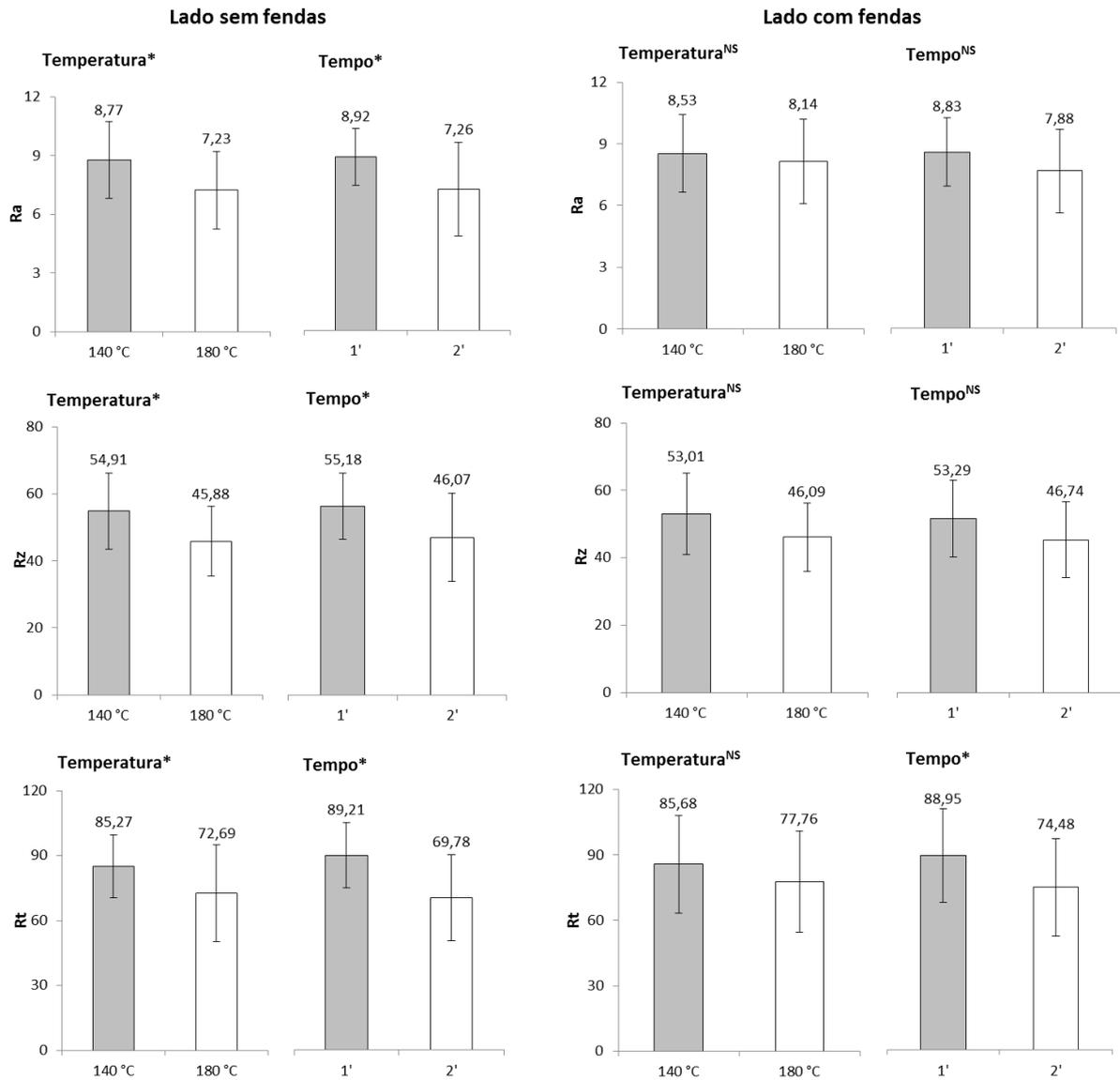


FIGURA 3.2 – Análise fatorial da temperatura e do tempo para os parâmetros de rugosidade.

*.NS fator significativo e não significativo, respectivamente, na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Para o R_t , no entanto, o aumento do tempo para dois minutos foi importante para a redução desse parâmetro (Figura 3.2). Isso foi observado também pelo resultado do teste t pareado na Figura 3.1 que mostra que esse parâmetro só foi reduzido

significativamente a partir do tratamento de 140 °C e dois minutos e que dentro da temperatura de 180 °C a maior redução ocorreu quando o tempo passou para dois minutos (32% de redução). Isso mostra que para a redução do R_a e do R_z no lado mais rugoso, a compressão com uma temperatura de 140 °C por um minuto foi suficiente. O uso da temperatura de 180 °C e do tempo de dois minutos não seriam justificáveis nesse caso. Porém, como para o R_t o aumento do tempo foi significativo, então para reduzir os três parâmetros no lado com as fendas o uso do tratamento de 140 °C e dois minutos seria mais adequado.

Além da análise da rugosidade em cada lado da lâmina, foi feita uma análise para identificar diferenças entre os lados. As Tabelas 3.2 e A.7 no anexo mostram que antes do tratamento existia uma diferença significativa da rugosidade (R_a e R_z) entre os lados. No entanto, após o tratamento termomecânico, essa diferença deixou de existir a partir do tratamento de 140 °C e um minuto. Então nesse caso, se a intenção for deixar os lados da lâmina mais semelhantes, homogêneos, o uso dos tratamentos mais severos, de 180 °C, não se faz necessário.

TABELA 3.2 – Comparação entre a rugosidade do lado sem fendas com a do lado com fendas.

Tratamentos	Parâmetros	Valores de Rugosidade (μm)		F calculado
		Lado sem fendas	Lado com fendas	
Amostras não-tratadas	R_a	11,05	14,72	9,09*
	R_z	59,79	80,90	12,3*
	R_t	100,52	111,69	2,7 ^{NS}
140 °C/1 min./2,7 N/mm ²	R_a	9,39	8,73	0,69 ^{NS}
	R_z	57,04	55,54	0,06 ^{NS}
	R_t	90,20	90,25	0,00 ^{NS}
140 °C/2 min./2,7 N/mm ²	R_a	8,22	8,34	0,18 ^{NS}
	R_z	52,79	50,49	0,19 ^{NS}
	R_t	80,84	81,11	0,00 ^{NS}
180 °C/1 min./2,7 N/mm ²	R_a	8,39	8,93	0,57 ^{NS}
	R_z	53,13	50,79	0,30 ^{NS}
	R_t	88,21	87,66	0,00 ^{NS}
180 °C/2 min./2,7 N/mm ²	R_a	6,31	7,43	1,57 ^{NS}
	R_z	39,36	43,00	0,62 ^{NS}
	R_t	58,72	67,86	0,97 ^{NS}

*:NS diferença entre os lados significativa e não significativa, respectivamente, no teste F a 5% de significância. F tabelado = 4,48.

A Figura 3.3 mostra os perfis de rugosidade de uma amostra antes e depois do tratamento, nos dois lados. No lado sem fendas, o perfil apresenta vales e picos menores (primeira imagem). As fendas de laminação podem ser identificadas no perfil antes do tratamento que mostra elevados picos e profundos vales (setas na segunda imagem).

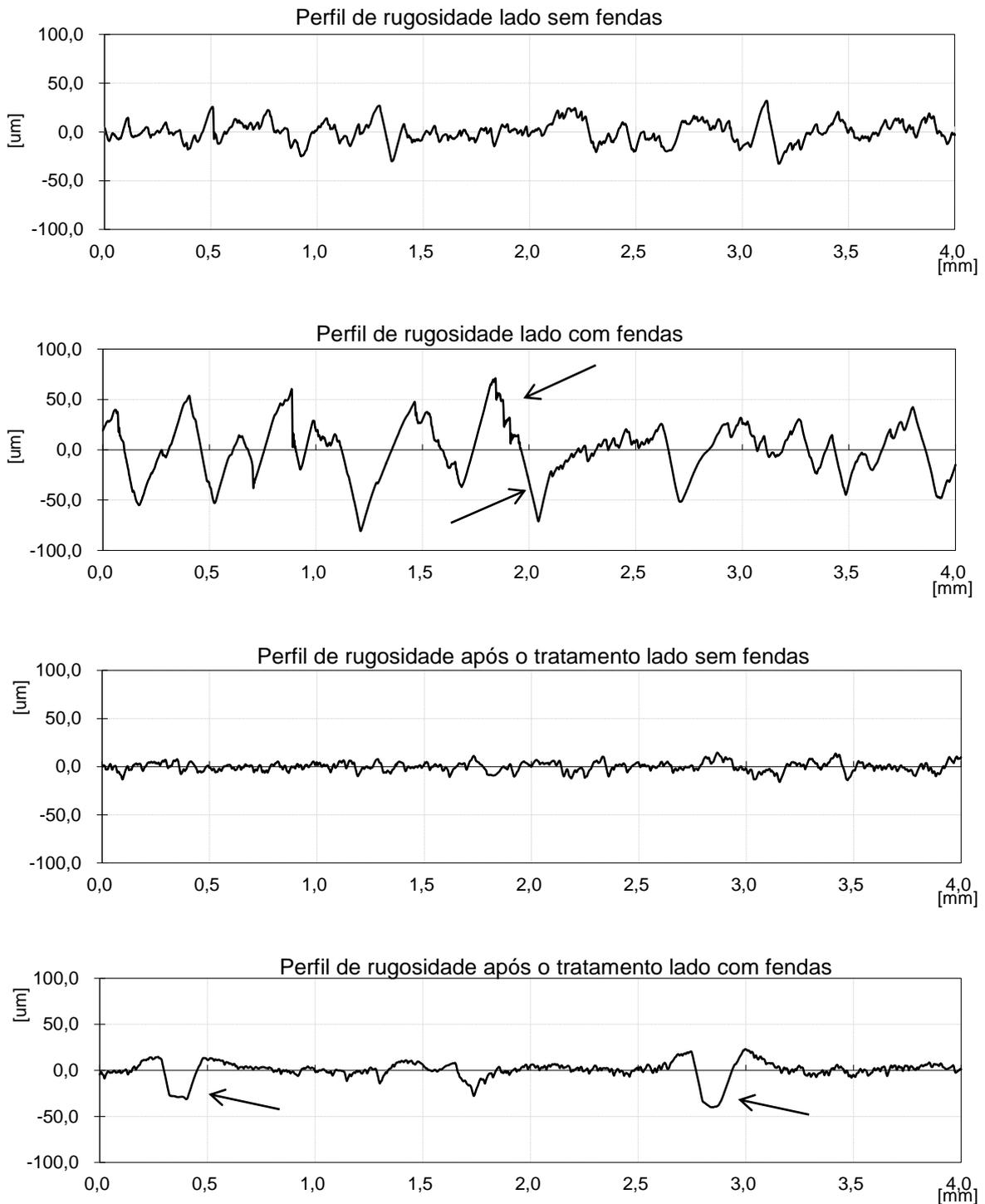


FIGURA 3.3 – Perfis de rugosidade nos dois lados, antes e depois do tratamento.

Após o tratamento ambos os lados apresentaram redução na altura dos picos e na profundidade dos vales, como mostra as duas últimas imagens. Na última imagem, no entanto é possível observar ainda dois vales no perfil (indicados por setas). Porém, a profundidade desses vales é menor do que quando comparada ao perfil não tratado.

A redução da rugosidade foi causada pela compressão juntamente com o calor. O calor causa a termoplastificação da lignina, que fica mais viscosa enquanto quente e depois se solidifica quando esfria, deixando a superfície da madeira mais lisa e a compressão ajudou a comprimir as estruturas da madeira como os raios, vasos e fibras.

Bekhta e Marutzky (2007) observaram que lâminas de beech (*Fagus* sp.) tratadas termomecanicamente apresentaram uma redução de 27,93 no R_a e 22,29% no R_z . Essa redução significou uma diminuição de até 25% na quantidade de cola e 22% na pressão usada para colagem do compensado. Além disso, uma rugosidade adequada proporciona uma melhor aderência entre as lâminas, aumentando a resistência ao cisalhamento na linha de cola de painéis compensados. Isso será discutido melhor no capítulo 3.

A melhora na qualidade da superfície da lâmina de amescla foi percebida também em relação à molhabilidade. A molhabilidade foi analisada pelo ângulo de contato (AC) final, onde uma superfície com maior molhabilidade possui menor AC final. Na Figura 3.4 estão as medições do AC em função do tempo, em segundos. Primeiro observou-se a diferença na molhabilidade existente entre os lados da lâmina. No gráfico do lado sem fendas, antes do tratamento, o AC tem uma tendência constante aproximadamente após os 50 segundos. No gráfico ao lado, no entanto, percebe-se que o AC chega a zero aproximadamente aos 70 segundos.

Isso aconteceu por que, a gota d'água quando entra em contato com a superfície da madeira espalha e penetra sob a superfície. Ao longo do tempo o formato da gota muda e o ângulo de contato se torna mais ou menos estável (PIAO; WINANDY; SHUPE, 2010). Ao contrário disso, no outro lado da lâmina, as fendas de laminação drenam a gota d'água rapidamente, impedindo que o AC final seja maior que zero.

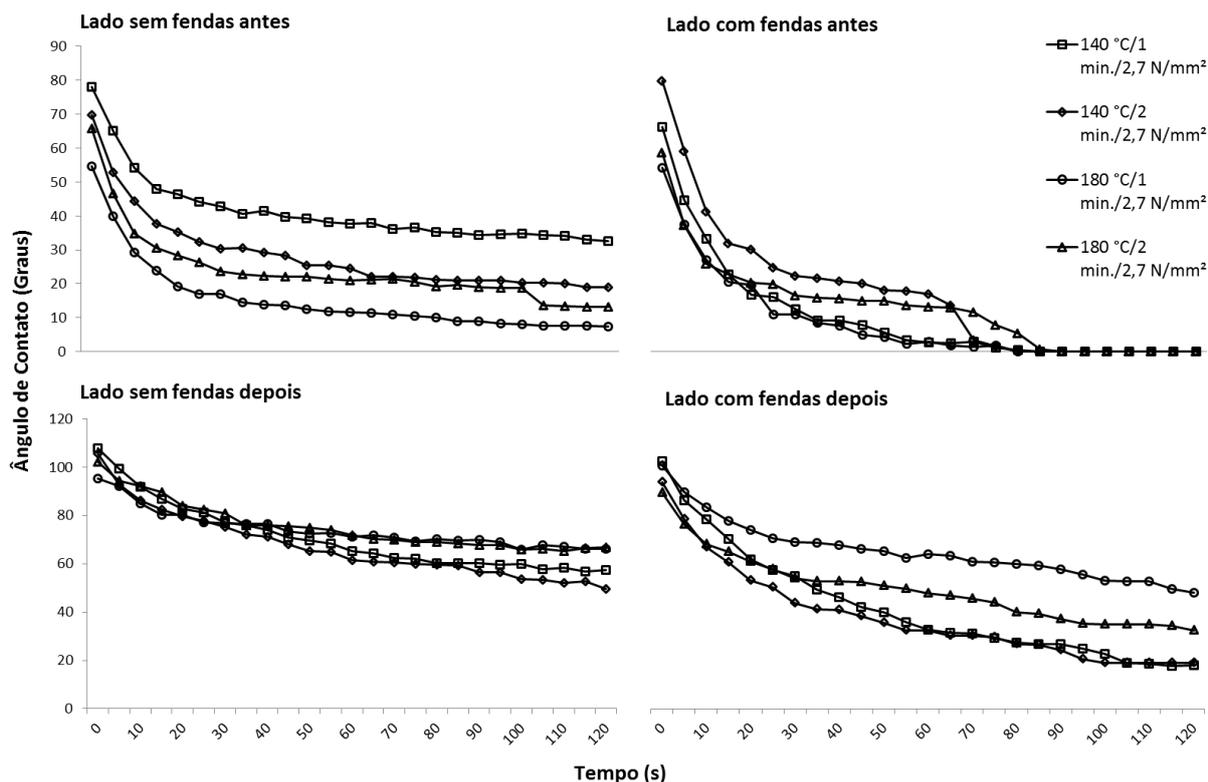


FIGURA 3.4 – Molhabilidade da superfície das lâminas de amescla expressa pelo ângulo de contato (em graus) antes e depois do tratamento nos dois lados das lâminas.

A Figura 3.5 mostra o comportamento da gota d'água ao ser colocada na superfície da lâmina de amescla. Observou-se que no lado das fendas de laminação a gota penetrou totalmente na madeira (Figura 3.5 B) e no lado sem as fendas a gota permaneceu na superfície da madeira após os 120 segundos (Figura 3.5 A). No entanto, depois do tratamento a superfície da lâmina tornou-se menos rugosa e o resultado foram ângulos de contato significativamente maiores nos dois lados.



FIGURA 3.5 – Imagens da gota d'água na superfície da lâmina de amescla no lado sem as fendas (A) e no lado com as fendas (B).

A Tabela 3.3 mostra os AC finais antes e depois do tratamento. No lado sem fendas, o AC final médio depois do tratamento variou de 49,52 graus até 69,12 graus. O maior aumento do AC ocorreu no tratamento de 180 °C e um minuto, cujo ângulo aumentou de 7,41 graus para 65,91 graus (789% de aumento). No lado com fendas, onde antes o AC final médio era de zero grau, depois do tratamento os valores aumentaram entre 17,49 graus até 67,65 graus no tratamento de 180 °C e dois minutos. A análise pareada mostrada na Tabela 3.3 mostra que o AC final aumentou significativamente no lado sem fendas em todos os tratamentos, no entanto, no lado com fendas o aumento do AC final só foi significativo nos tratamentos de 180 °C.

TABELA 3.3 – Valores dos ângulos de contato finais médios para os dois lados das lâminas de Amescla.

Tratamentos	Ângulo de Contato Final (Graus)		Valor de t (teste t pareado)	
	Antes	Depois		
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	32,54	57,34	-2,796*	
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	Lado sem fendas	18,89	49,52	-3,182*
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		7,41	65,91	-6,731*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		13,12	69,12	-5,143*
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		Lado com fendas	0,00	17,49
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	0,00		18,50	-1,847 ^{NS}
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	0,00		34,04	-3,347*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	0,00		67,65	-5,818*

*.^{NS} diferença significativa e não significativa, respectivamente, entre a condição antes e depois pelo teste t pareado a 5% de significância.

Dessa forma, para reduzir a molhabilidade no lado com fendas de laminação recomenda-se o uso do tratamento de 180 °C e um minuto, já que o aumento do tempo não foi significativo (Figura 3.6 e Tabela A.11 no anexo). No lado sem fendas, a molhabilidade pode ser reduzida significativamente com o uso do tratamento de 140 °C e um minuto, já que o aumento da temperatura ou do tempo não foi significativo (Figura 3.6 e Tabela A.11 no anexo).

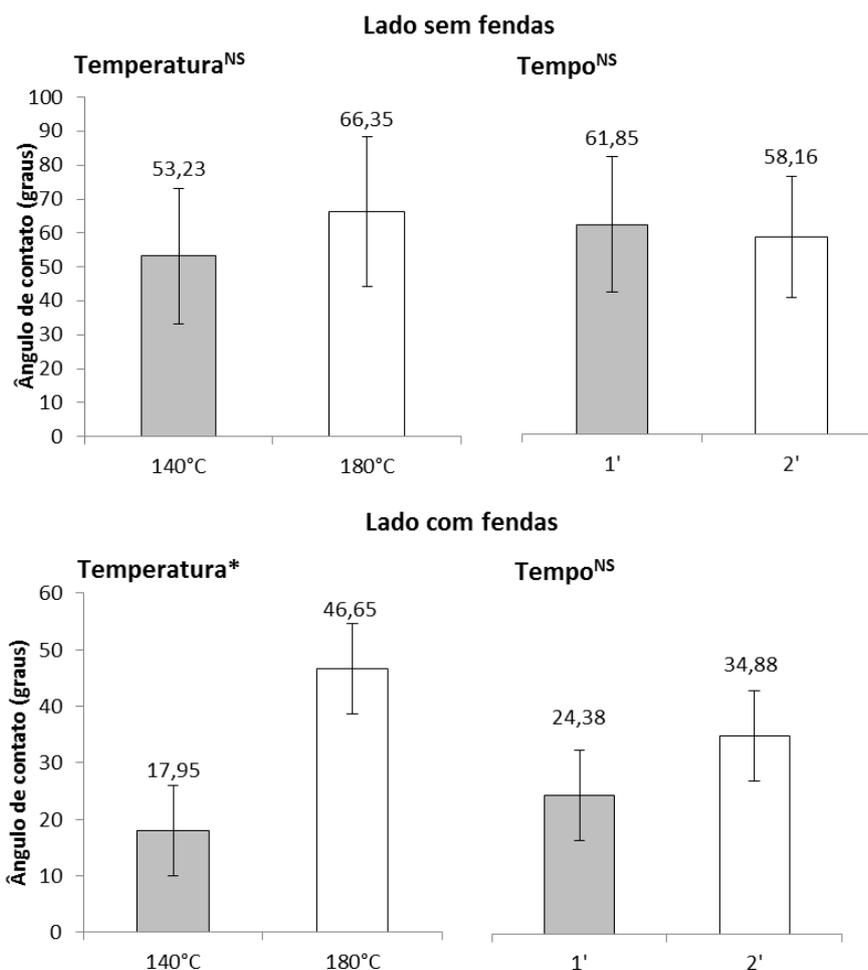


FIGURA 3.6 – Análise fatorial da temperatura e do tempo para o ângulo de contato final.

*. ^{NS} fator significativo e não significativo, respectivamente, na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Hakkou *et al.* (2005) comentam que a madeira tem comportamento hidrofóbico quando tratamentos térmicos são aplicado em temperaturas acima da temperatura de transição vítrea. Esses autores sugerem que a redução da molhabilidade acontece por conta de um rearranjo conformacional dos polímeros da madeira, como resultado da plastização da lignina. A redução da molhabilidade depois de tratamentos térmicos também foi relatada por Kocafe *et al.* (2008) e Sernek, Gérardin e Pétrissans (2010).

Outra variável que aumentou significativamente após o tratamento termomecânico foi a densidade aparente. Na Figura 3.7 são apresentados os valores de densidade das lâminas antes e depois dos tratamentos. Os valores da densidade inicial variaram de 0,50 g/cm³ a 0,53 g/cm³. Após o tratamento, observou-se um aumento significativo da densidade, principalmente nos tratamentos de dois minutos, onde o

aumento foi de 14%. O menor aumento foi observado no tratamento de 140 °C e um minuto (9,43% de aumento).

O aumento da densidade foi decorrente da redução da espessura das lâminas e o aumento da temperatura para 180 °C ou do tempo para dois minutos não influenciou significativamente a densidade, como mostra a Figura 3.7 e a Tabela A.10 no anexo. Dessa forma, analisando o resultado do teste t pareado, conclui-se que um tratamento de 140 °C e um minuto mantendo-se a pressão constante de 2,7 N/mm² foram suficientes para aumentar a densidade aparente das lâminas de amescla (Figura 3.7).

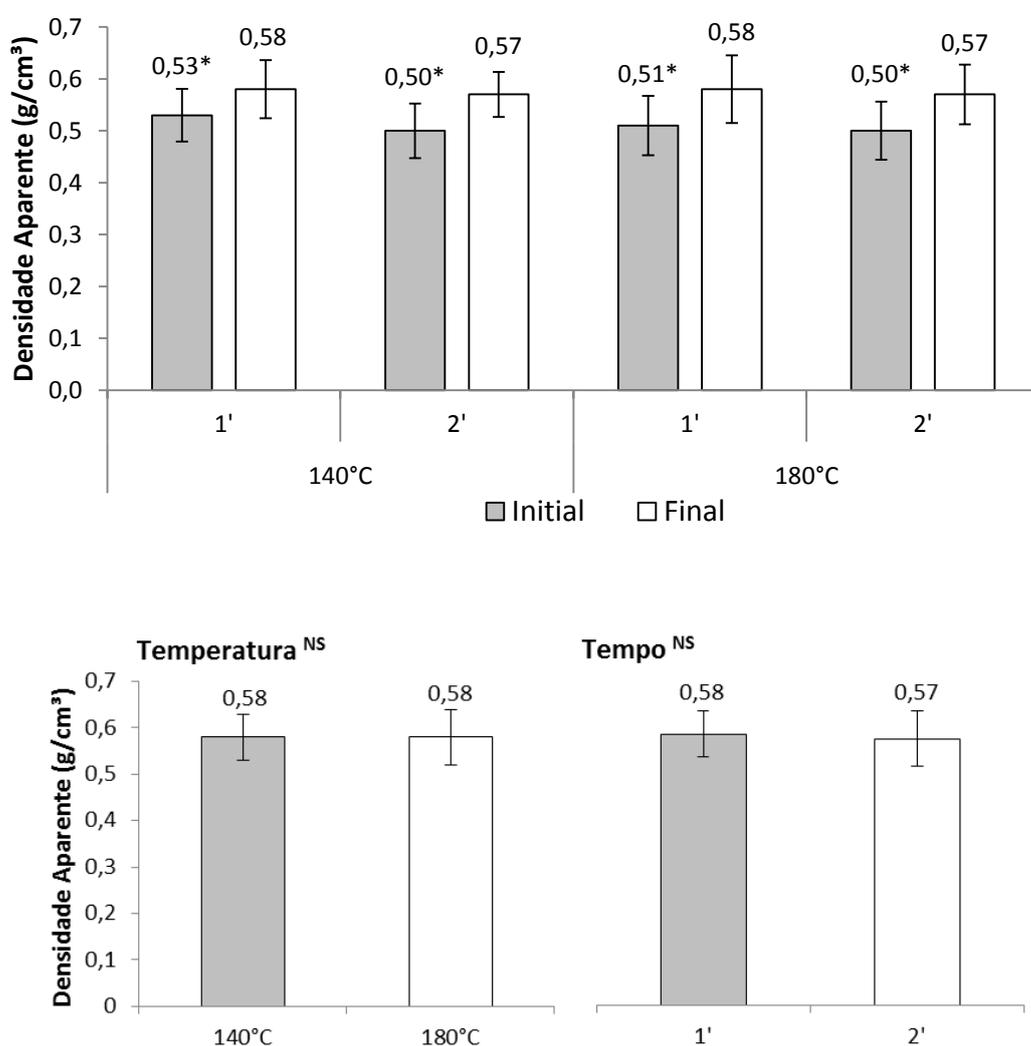


FIGURA 3.7 – Densidade aparente das lâminas antes e depois dos tratamentos.

*diferença significativa entre a condição antes e depois pelo teste t pareado a 5% de significância. ^{NS} fator não significativo na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

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 Figura 3.8 mostra a TC imediatamente medida após o tratamento e a definitiva, medida após a climatização. TC imediata variou entre 12,70% e 17,88%. Com a climatização, a madeira adsorveu umidade do ar e a lâmina sofreu uma pequena expansão da espessura, o que causou naturalmente uma diminuição nos valores da TC. Dessa forma, a TC definitiva variou entre 10,54%, obtida no tratamento de 140 °C e um minuto, e 15,51%, no tratamento de 180 °C e dois minutos.

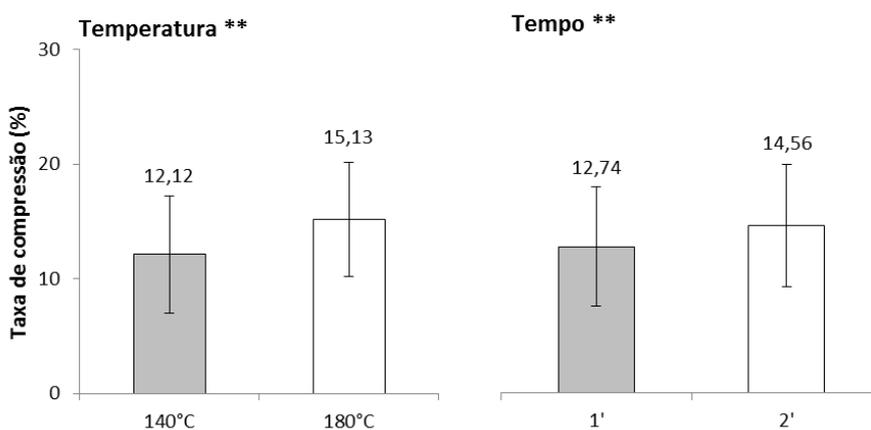
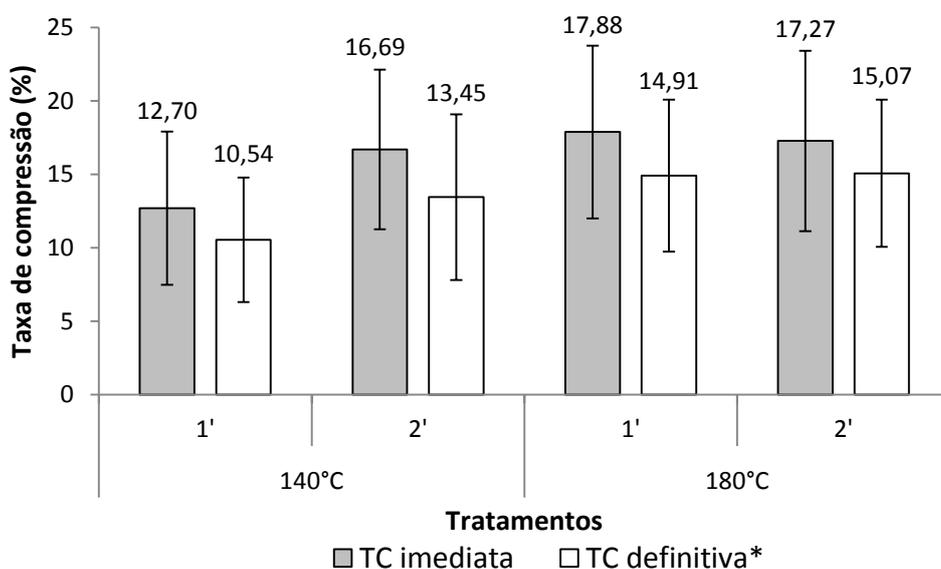


FIGURA 3.8 – Taxa de compressão medida imediatamente após o tratamento (TC imediata) e depois da climatização (TC definitiva).

*diferença significativa entre os tratamentos pelo teste F a 5% de significância. **fator significativo na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Outros autores encontraram TC semelhantes para densificação de lâminas. Bekhta, Niemz e Sedliacik (2012) trataram termomecanicamente lâminas de 1,5 mm de espessura de birch (*Betula pubescens*) à temperaturas entre 100 e 200 °C, tempo de 0,5 a dois minutos e pressão entre 3,0 e 9,0 N/mm². Usando o tratamento mais severo (200 °C, 9,0 N/mm² por dois minutos), esses autores encontraram uma TC imediata de 17%. Para as lâminas de amescla, esse valor foi conseguido usando uma temperatura de 180 °C, pressão de 2,7 N/mm² e tempo de um minuto.

Bekhta e Marutzky (2007) conseguiram uma TC de 33% usando uma pressão de 15 N/mm² a 200 °C em lâminas de 1,8 mm de espessura de beech (*Fagus* sp.). Diminuindo a pressão para 5,0 N/mm², os autores conseguiram uma TC de 11%, valor um pouco inferior ao que foi conseguido para as lâminas de amescla usando temperatura e pressão menores.

A análise fatorial indicou que a TC definitiva aumentou com o aumento da temperatura para 180 °C ou do tempo para dois minutos (Figura 3.8 e Tabela A.10 no anexo). Isso corresponde ao comportamento dos polímeros viscoelásticos da madeira que quando entram no estado viscoso facilitam a deformação da madeira. Embora tenha ocorrido de fato a compressão do material em função do aumento da temperatura ou do tempo, esse efeito não foi observado para a densidade, que não aumentou em função desses parâmetros, provavelmente pela perda de massa (PM) sofrida pelas lâminas nos tratamentos mais severos.

A Figura 3.9 mostra a PM imediata e definitiva. A PM imediata variou de 8,22% a 9,6% e nesses valores estão sendo considerados: a perda de massa por desidratação, por degradação de componentes da madeira e por evaporação de extrativos (ROWELL; LEVAN-GREEN, 2005; KORKUT *et al.*, 2008). Depois da climatização a madeira entra em equilíbrio com o ambiente e ganha massa em água e por isso os valores da PM definitiva são menores, variando de 1,93% a 2,95%. Esses valores representam a perda de componentes e extrativos da madeira.

Os maiores valores de PM definitiva foram encontrados nos tratamentos de 180 °C e um minuto e 180 °C e dois minutos. Esses valores são respectivamente, 2,87% e 2,95%. A análise fatorial mostrou que a PM definitiva aumentou quando houve aumento da temperatura para 180 °C ou do tempo para dois minutos e também mostrou uma interação entre esses fatores (Figura 3.9 e Tabela A.10 no anexo). Esse resultado também foi encontrado por Del Menezzi (2004) que mostrou que a PM foi maior quando a maior temperatura foi usada com o maior tempo.

Considerando que a massa inicial média das lâminas, nos tratamentos de 180 °C e um minuto e 180 °C e dois minutos, era respectivamente de 63 g e 62 g, a massa perdida em compostos da madeira e extrativos foi de 1,81 g e 1,83 g. Embora esse trabalho com amescla não tenha contemplado a análise química da madeira tratada para identificar e quantificar os componentes degradados, a partir de alguns resultados baseados na capacidade higroscópica da madeira, supõe-se que algumas hemiceluloses foram degradadas. Isso porque Rowell e Youngs (1981), Weiland e Guyonnet (2003) e Boonstra e Tjeedersma (2006), comentam que as hemiceluloses são mais sensíveis ao calor e a sua degradação afeta a capacidade da madeira de adsorção de água. Esses resultados serão vistos no próximo tópico.

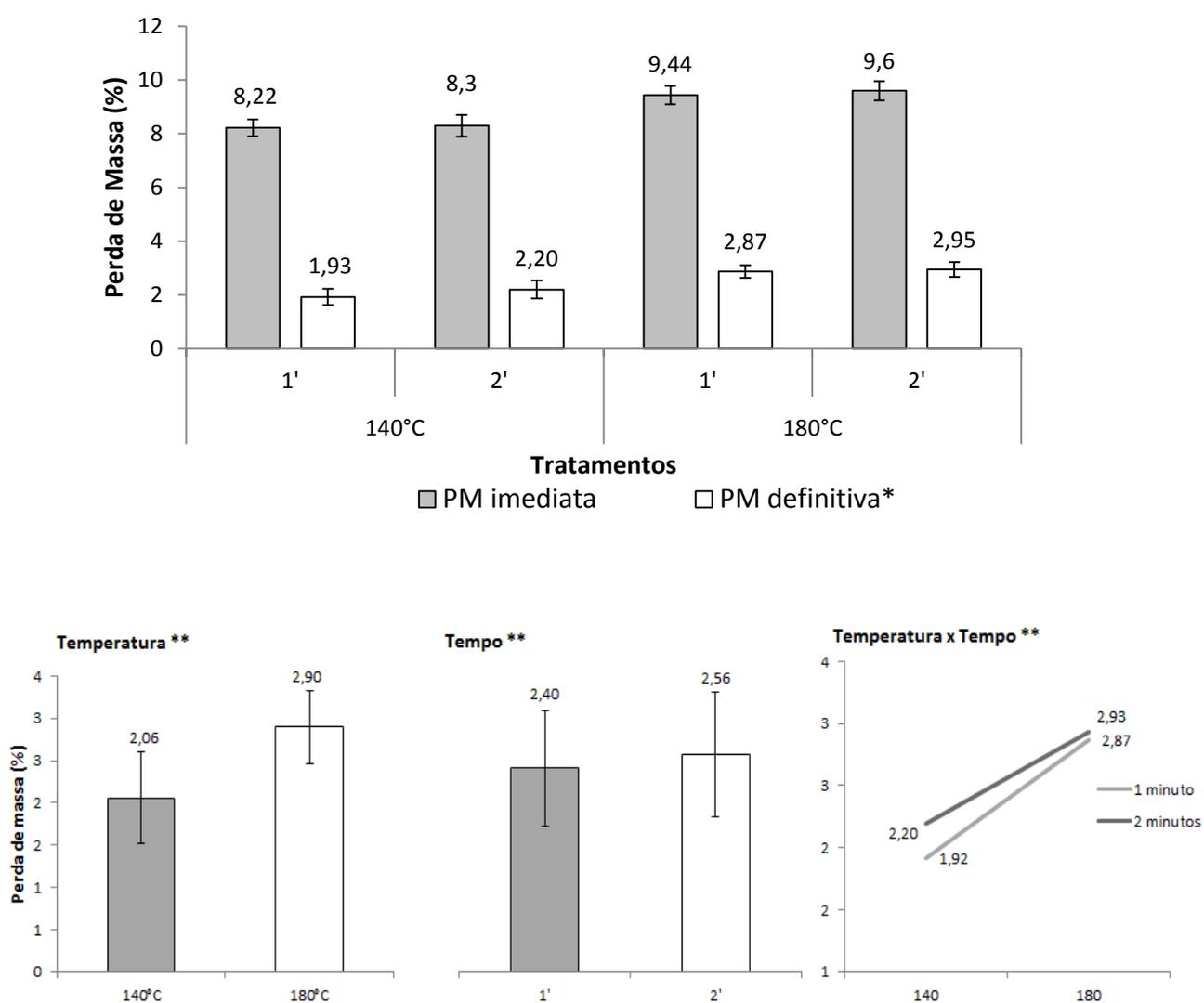


FIGURA 3.9 – Perda de massa medida imediatamente após o tratamento (PM imediata) e depois da climatização (PM definitiva)

*diferença significativa entre os tratamentos pelo teste F a 5% de significância. **fator significativo na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão. A linha indica o TUE inicial medido antes das lâminas serem tratadas.

3.3 ESTABILIDADE DIMENSIONAL

A estabilidade dimensional foi avaliada usando os dados do IE e AB duas horas e do TUE. O IE e a AB foram calculados apenas para duas horas, pois foi observado que as lâminas atingiram máximo inchamento e absorção nas duas primeiras horas. Chegou-se a essa conclusão, pois os valores medidos após 24 horas praticamente mantiveram-se constantes. Portanto os dados de IE e AB 24 horas não foram analisados.

Em materiais comprimidos, como painéis de partículas e madeiras tratadas termomecanicamente, ocorre o acúmulo de tensões de compressão internas ao material. Quando o material é colocado em água, ocorre a liberação dessas tensões, além do inchamento próprio da madeira. Segundo Del Menezzi (2004) e Mohebbi *et al.* (2009), o inchamento causado pela liberação das tensões é irreversível e causa problemas de estabilidade dimensional nos painéis.

O IE apresentado na Figura 3.10 é o somatório do IE higroscópico próprio da madeira, com o IE causado pela liberação das tensões de compressão. Observou-se que os valores do IE para as amostras tratadas foram significativamente superiores ao da testemunha (Figura 3.10 e Tabela A.8 no anexo) e isso foi causado pela grande liberação das tensões do material tratado. O maior valor foi observado no tratamento de 140 °C e dois minutos, que foi 194% maior que o da testemunha.

De acordo com a análise fatorial (Tabela A.10 no anexo) o aumento da temperatura para 180 °C ou do tempo para dois minutos não aumentou significativamente o IE. Ou seja, o IE das amostras tratadas foi maior que a testemunha devido ao efeito da liberação das tensões de compressão, não importando para isso o aumento do tempo ou da temperatura do tratamento. Ainda pode-se estabelecer uma comparação do IE com a TC para avaliar a estabilidade dimensional. Considerando que o material não deve inchar mais do que ele foi comprimido, o IE não deve ser maior que a TC. Caso contrário, significaria que a densificação conseguida no tratamento termomecânico seria perdida quando o material entrasse em contato com a água.

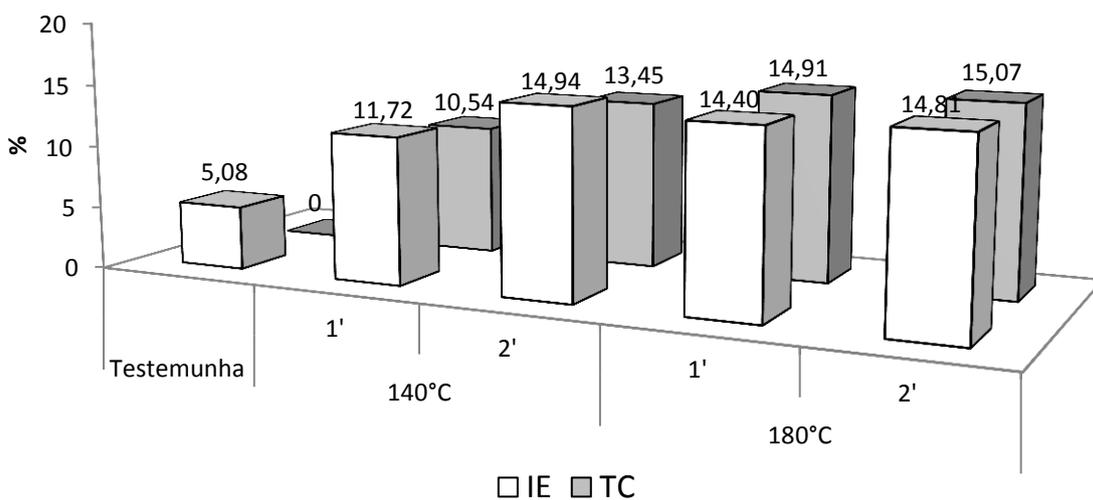
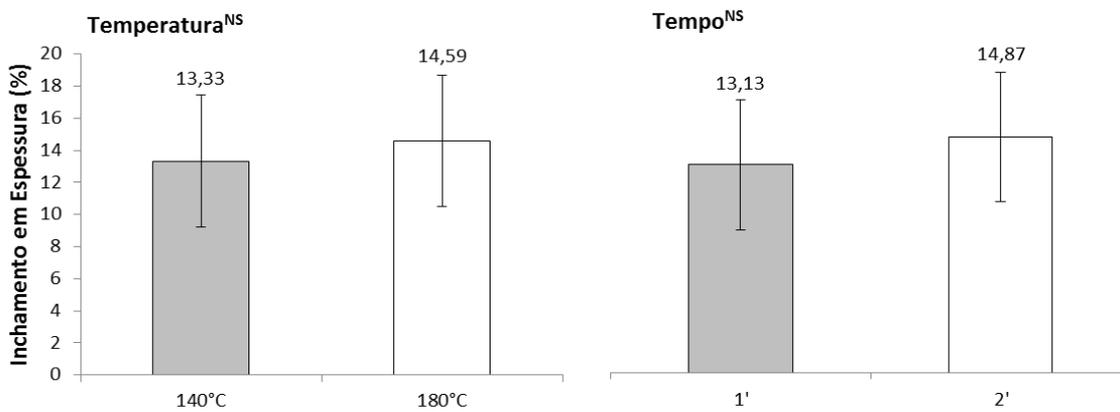
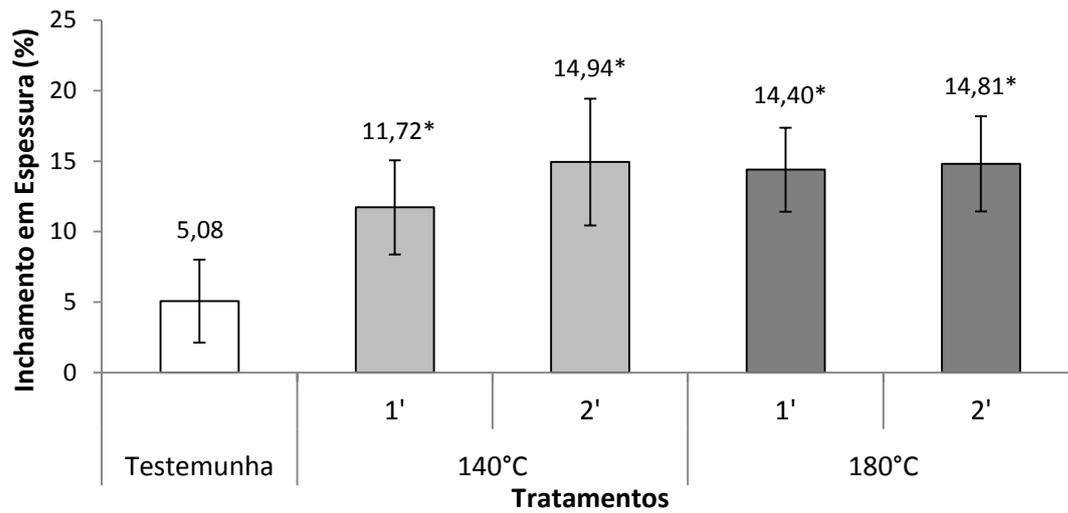


FIGURA 3.10 – Inchamento em espessura das lâminas tratadas termomecanicamente e a comparação com a taxa de compressão.

*diferença significativa a 5% de significância entre a média dos tratamentos e da testemunha pelo teste de Dunnett. ^{NS} fator não significativo na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

A Figura 3.10 mostra que nos tratamentos de 140 °C o IE foi maior que a TC, ou seja, o material retornou além da taxa em que ele foi comprimido. Nos tratamentos de 180 °C o IE das lâminas foi menor que a TC, ou seja, o material não inchou além da sua espessura densificada. Apesar dos valores de TC e IE não diferirem estatisticamente, essa comparação ainda mostra uma tendência de uma melhor estabilidade dimensional para as lâminas tratadas com 180 °C. Observando anteriormente (Figura 3.9), os tratamentos de 180 °C foram o que apresentam a maior PM definitiva, o que sugere uma maior perda de hemiceluloses e isso pode ter contribuído para a diminuição do IE higroscópico e reduzido o IE total. Cloutier, Fang e Mariotti (2008) também observaram que o IE de lâminas tratadas a 200 °C foi menor que a TC. O valor do IE foi de 40%, enquanto que a TC foi de 50%.

Outro resultado que corroborou com a redução da higroscopicidade da madeira foi a diminuição significativa do TUE (Figura 3.11). O aumento da temperatura para 180 °C foi o que causou essa diminuição significativa (Figura 3.11 e Tabela A.10 no anexo). Isso porque o aumento da temperatura, além de ter sido responsável pela degradação de alguns componentes, também pode ter sido responsável pelo aumento do grau de cristalinidade da região amorfa da celulose, apontado por muitos autores como uma das causas da redução da higroscopicidade de madeiras tratadas termicamente (ROWELL; YOUNGS, 1981; BHUIYAN *et al.*, 2000; 2001; BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006; DEL MENEZZI, 2004).

Embora o tratamento termomecânico tenha conseguido reduzir a adsorção de umidade (TUE), a absorção não foi alterada significativamente. A Figura 3.12 mostra apenas uma tendência de aumento da AB no sentido dos tratamentos de 180 °C, embora estatisticamente os valores dos tratamentos não sejam diferentes da testemunha. Essa tendência de aumento da AB foi causada pelo aumento da temperatura para 180 °C, identificada na análise fatorial, nessa mesma figura e na Tabela A.10 no anexo.

Esse resultado é diferente do que foi encontrado por Del Menezzi e Tomaselli (2006) que não observaram influência da temperatura na AB de painéis OSB tratados por contato térmico. Os autores acreditam que a AB esteja relacionada com a densidade. Uma densidade maior resulta em um menor número de espaços vazios e conseqüentemente resultaria em uma menor absorção de água. No caso para as lâminas de amescla, a explicação para o aumento da AB é de que durante o ensaio, os vasos achatados tenham sido reabertos, provocando uma sucção maior de água para o interior da lâmina.

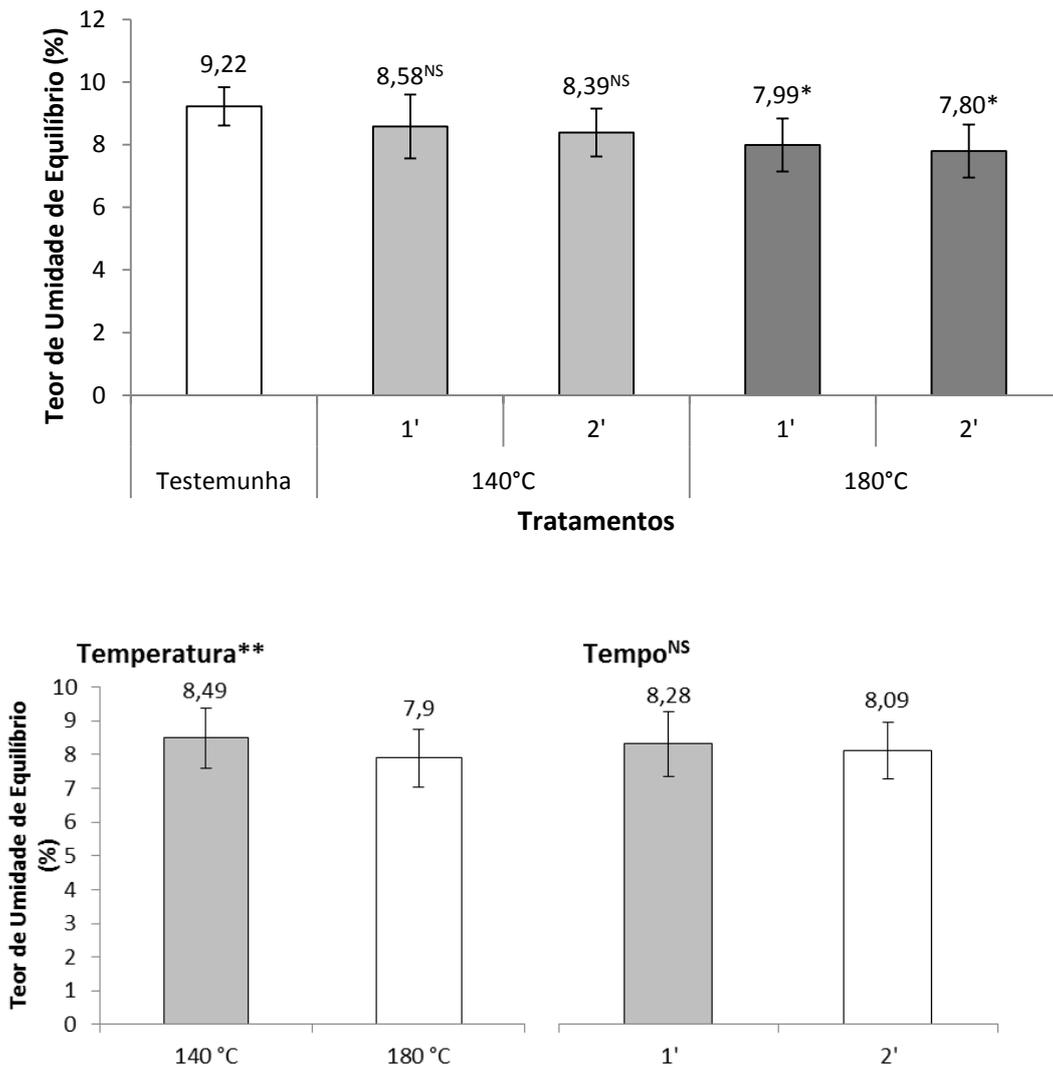


FIGURA 3.11 – Teor de umidade de equilíbrio das lâminas tratadas termomecanicamente.

*.NS diferença significativa e não significativa, respectivamente, a 5% de significância pelo teste de Dunnett. **.NS fator significativo e não significativo, respectivamente, na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

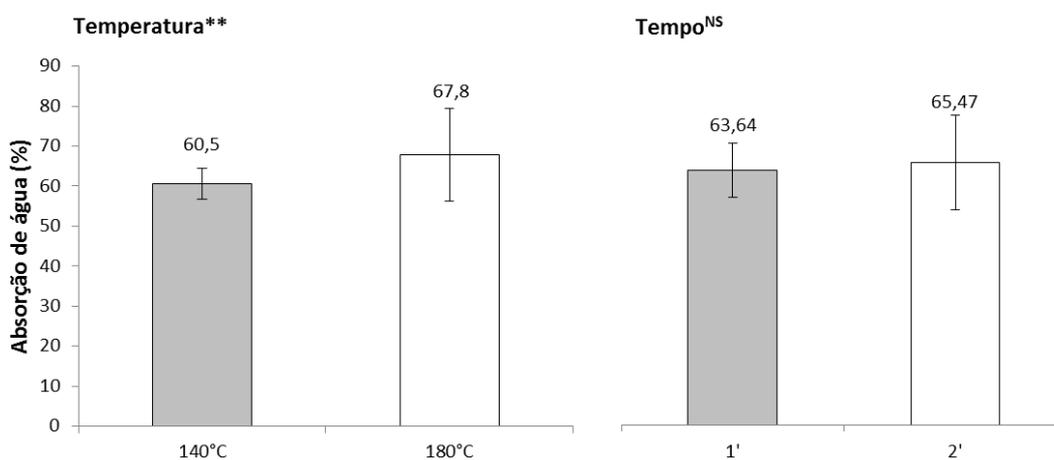
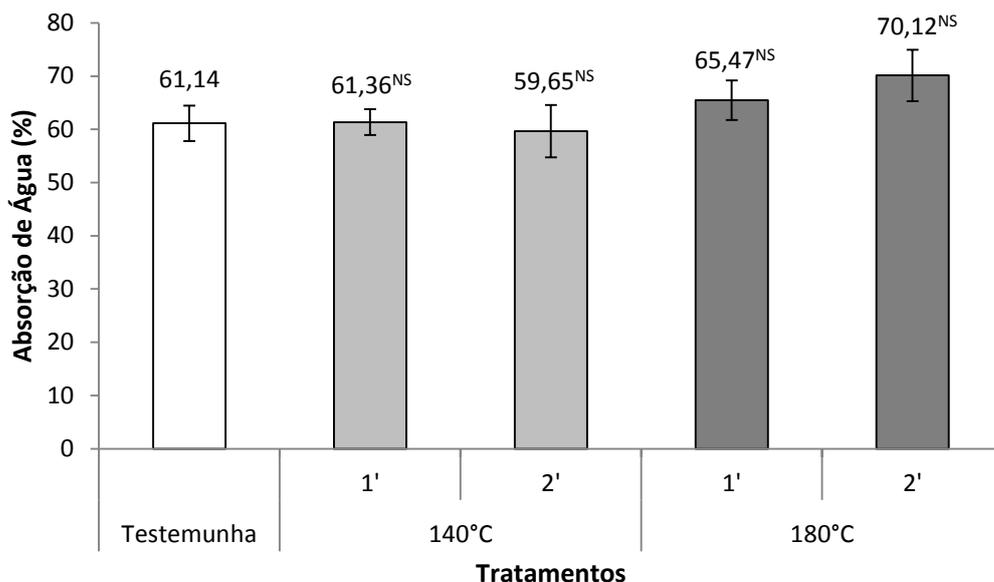


FIGURA 3.12 – Absorção de água das lâminas tratadas termomecanicamente.

^{NS} diferença não significativa a 5% de significância pelo teste de Dunnett. ^{**},^{NS} fator significativo e não significativo, respectivamente, na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

3.4 PROPRIEDADES COLORIMÉTRICAS

Antes do tratamento as médias dos parâmetros colorimétricos foram: $L^* = 76,99$; $a^* = 8,71$; $b^* = 22,59$; $C = 24,25$ e $h^* = 68,95$. Usando a tabela de cores sugerida por Camargos e Gonzalez (2001), classificou-se a madeira de amescla como branca. Isso foi definido principalmente pela alta claridade (quando o $L^* > 56$), pela presença marcante do pigmento amarelo e baixa presença do pigmento vermelho. De acordo com

essa tabela de cores o ângulo de tinta para a cor branca deveria estar entre 71 e 79, porém o encontrado na amostra foi um intervalo menor, entre 67 e 70, o que indicaria um pequeno afastamento desta cor, talvez influenciado pela pigmentação amarela.

Observou-se que a claridade diminuiu depois do tratamento termomecânico (Figura 3.13 A e Tabela A.6 no anexo). Essa redução foi maior para as amostras tratadas a 180 °C durante dois minutos, cujo valor foi 11,64% menor em relação à amostra não tratada. O tratamento menos severo apresentou a menor diferença de claridade. Isso foi identificado pela análise fatorial que mostrou que o aumento da temperatura para 180 °C ou do tempo para dois minutos foi responsável por diminuir o L* significativamente (Figura 3.14 e Tabela A.10 no anexo). Del Menezzi (2004) também comprovou estatisticamente que a claridade foi afetada pelo aumento de temperatura ou tempo. O aumento isolado de temperatura reduziu o L* em 7,69%, enquanto o aumento de tempo reduziu esta variável em 2,63%.

A diminuição de L* em função de tratamentos térmicos é comentada por vários autores (CHARRIER *et al.*, 2002; DEL MENEZZI, 2004; ESTEVES *et al.*, 2008; LOPES, 2010; SUNDQVIST, 2004). Além disso, segundo Charrier *et al.* (2002) a diminuição do L* é causada pelo escurecimento da superfície da madeira que acontece pela oxidação de algumas substâncias. Sundqvist (2004) comenta que o escurecimento de madeiras pelo tratamento térmico pode produzir madeiras de tons mais amarronzados, o que é interessante quando se pensa em substituir ou imitar tons de madeiras duras tropicais.

Lopes (2010) tratou termicamente madeira de *Eucalyptus grandis* entre 180 °C e 230 °C de 15 a minutos a quatro horas e também observou uma redução da coordenada L*, indicando um escurecimento da madeira. O autor também observou que quanto maior a temperatura e o tempo maior é a redução da claridade da madeira. Os valores de L* encontrados variaram de 71,01 (tratamento de 200 °C por 15 minutos) a 30,98 (tratamento de 230 °C por quatro horas).

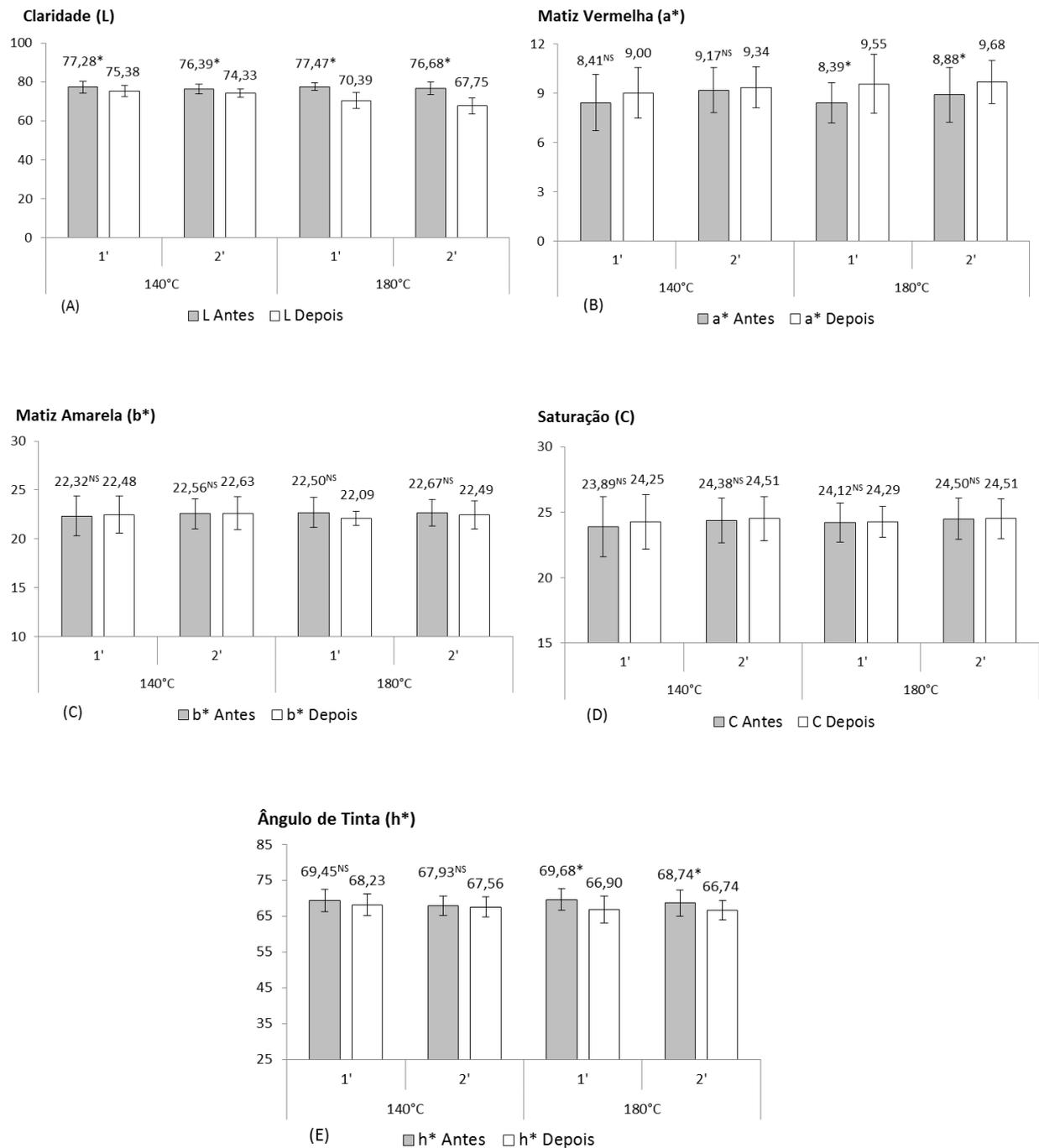


FIGURA 3.13 – Média das coordenadas colorimétricas nas lâminas antes e depois do tratamento.

*.NS diferença significativa e não significativa entre a condição antes e depois pelo teste t pareado a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

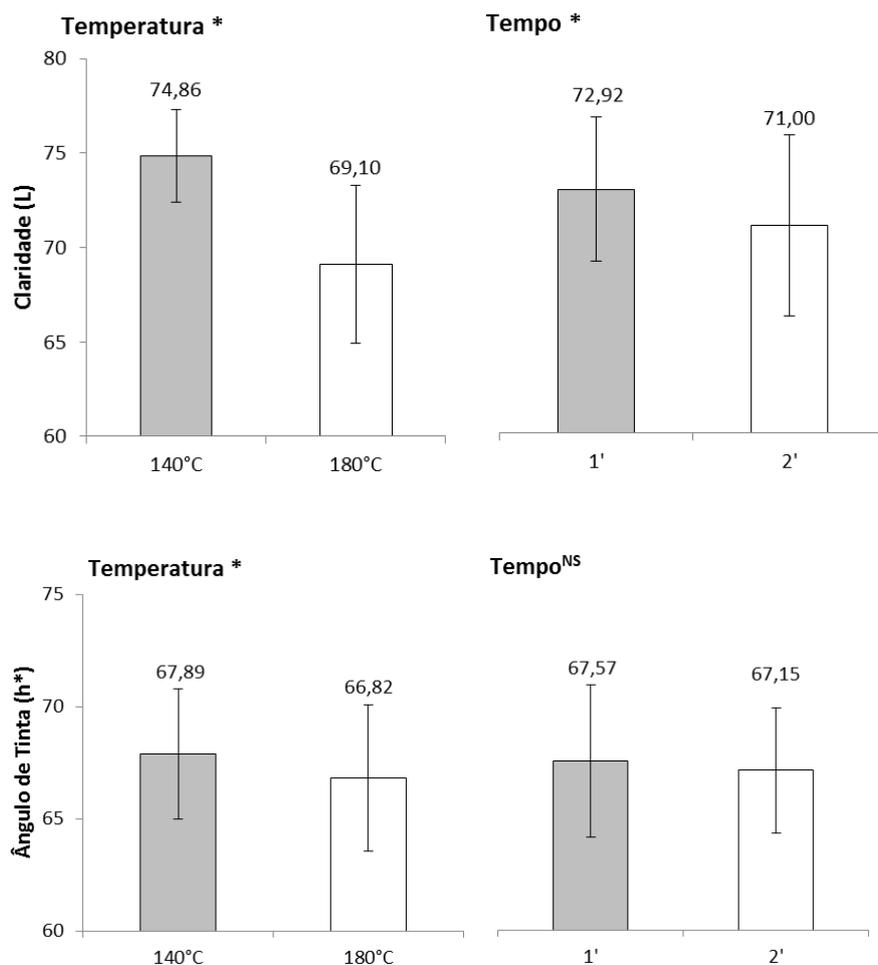


FIGURA 3.14 – Efeito da temperatura e do tempo na clareza e no ângulo de tinta da madeira de amescla.

*.NS fator significativo e não significativo, respectivamente, na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

As variáveis b^* e C não foram modificadas pelo tratamento termomecânico (Figuras 3.13 C e D e Tabela A.6 no anexo). Lopes (2010) observou a diminuição da coordenada b^* nas madeiras termoretificadas. Na testemunha o valor para b^* foi de 18,59, ficando entre 17 e 21 nos demais tratamentos e diminuindo para 11,21 no tratamento mais severo (230 °C por quatro horas).

Esperava-se que a saturação diminuísse com a temperatura e com o tempo do tratamento, tornando a cor da madeira menos saturada, ou seja, com menor grau de pureza. Isso foi observado para as madeiras de Jequitibá (*Cariniana micrantha*) e Louro-vermelho (*Sextonia rubra*) no trabalho de Gouveia (2008), que as tratou termicamente a 150 °C e 200 °C durante uma e duas horas. A saturação na madeira de

Jequitibá diminuiu de 17,15 para 10,42 no tratamento mais severo e no Louro-vermelho diminuiu de 12,72 para 9,37.

A coordenada a^* que representa a matiz vermelha aumentou significativamente a partir de 180 °C (Figura 3.13 B e Tabela A.6 no anexo). O aumento foi de 13,82% e 9% nos tratamentos de 180 °C por um e dois minutos, respectivamente. Apesar disso, a análise fatorial não identificou que esse aumento tenha sido causado em função do aumento da temperatura ou do tempo ou da interação entre eles (Tabela A.10 no anexo).

O ângulo de tinta (h^*), que varia entre as coordenadas a^* e b^* teve uma redução significativa, indicando que a cor da madeira tratada tende a aproximar-se do eixo a^* (matiz vermelha). Essa redução, porém só foi significativa a partir de 180 °C, onde o h^* diminuiu de 69,68 graus para 66,90 graus no tratamento de um minuto e de 68,74 graus para 66,74 graus no de dois minutos (Figura 3.13 E e Tabela A.6 no anexo). A Figura 3.14 e a Tabela A.10 no anexo mostram a análise fatorial onde o aumento do fator temperatura foi significativo para a redução do ângulo de tinta.

O escurecimento de madeiras claras depois de tratadas termicamente também foi constatado por Gouveia (2008). No trabalho desse autor, o ângulo de tinta da madeira de Marupá (*Simarouba amara*) reduz de 82,30 graus para 68,29 graus quando tratada a 200 °C por duas horas. Baseando-se somente na claridade e na coordenada a^* e usando a tabela de cores de Camargos e Gonzalez (2001), a madeira de amescla tratada termomecanicamente tende ao amarelo-claro. No entanto, a diminuição do ângulo de tinta aproxima a cor da madeira tratada às cores mais escuras como oliva e marrom-oliva.

A variação da cor foi quantificada pelo ΔE e estabelece a variação do L^* , a^* e b^* das amostras tratadas em relação às não tratadas. Percebe-se na Figura 3.15 que a variação da cor nos tratamentos de 180 °C (9,73 e 6,77) foi maior que nos tratamentos de 140 °C (4,41 e 2,69) (Tabela A.9 no anexo). A análise fatorial mostrou que o aumento da temperatura causou efeito significativo na variação da cor, cuja média aumentou de 3,86 para 8,78. A interação entre temperatura e tempo foi significativa e a combinação da maior temperatura com o maior tempo resultou em uma maior variação (Figura 3.15 e Tabela A.10 no anexo).

Gouveia (2008) também observou o aumento do ΔE com aumento de tempo e temperatura. No tratamento mais severo (200 °C, durante duas horas), o autor mediu uma variação da cor na madeira de Marupá de 18,22, na madeira de Louro-vermelho de 17,92 e na madeira de Jequitibá foi medida uma variação de 11,49.

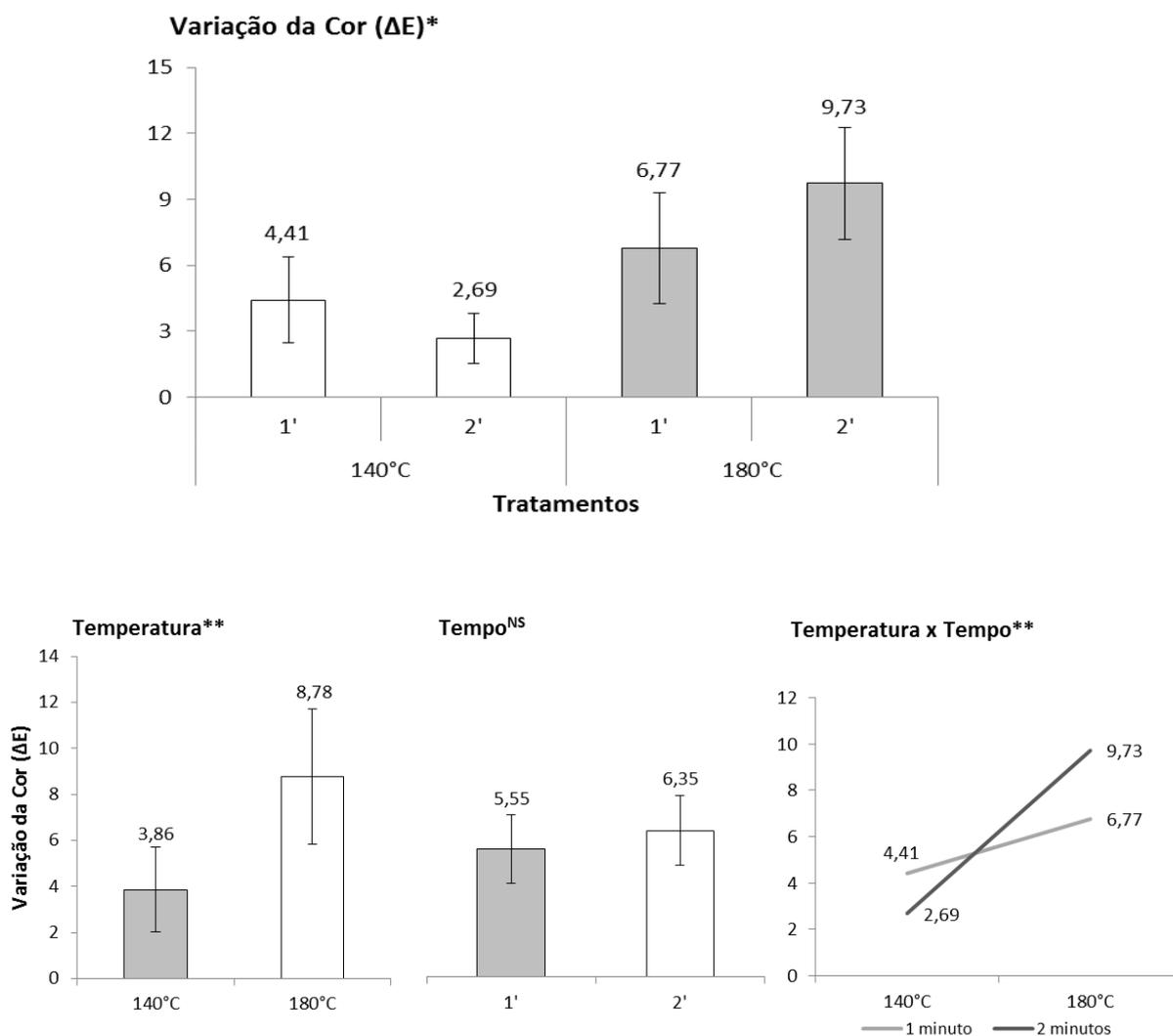


FIGURA 3.15 – Variação da cor (ΔE) na madeira de amescla e o efeito da temperatura e a sua interação com o tempo.

*diferença entre os tratamentos significativa pelo teste F a 5% de significância. **^{NS} fator significativo e não significativo, respectivamente, na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

4 CONCLUSÃO

O tratamento termomecânico melhorou a qualidade superficial das lâminas, pois reduziu a rugosidade e a molhabilidade das mesmas. A densificação das lâminas também foi alcançada. Do ponto de vista higroscópico houve a redução significativa do teor de umidade de equilíbrio. Apesar disso, não houve redução da absorção de água e do inchamento em espessura, o que é indesejado do ponto de vista da estabilidade dimensional. Recomenda-se para estudos futuros a investigação de pós-tratamentos que

permitam a liberação adequada das tensões de compressão, para que o material tenha uma melhor estabilidade dimensional.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO DOS COMPENSADOS PRODUZIDOS COM LÂMINAS DE AMESCLA (*Trattinnickia burseraefolia* (Mart.) Willd.) MODIFICADAS TERMOMECHANICAMENTE

1 INTRODUÇÃO

O compensado é um painel constituído de lâminas de madeira sobrepostas e cruzadas entre si, as quais são unidas por adesivos ou resinas, por meio de pressão e calor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE – ABIMCI, 2008). A qualidade do compensado depende, entre outros aspectos, da qualidade das lâminas empregadas na sua composição como incidência de defeitos, número de emendas, tipo do adesivo e da rugosidade. De acordo com Bekhta, Hiziroglu e Shepelyuk (2009) a aplicação do adesivo nas lâminas de madeira durante a produção do compensado é o parâmetro que mais influencia nas propriedades do painel.

A rugosidade da lâmina de madeira tem um papel importante na profundidade de penetração e distribuição uniforme do adesivo e por isso influencia na qualidade de colagem entre as lâminas. Essas propriedades não podem ser alcançadas a menos que a lâmina seja lixada para ter uma superfície lisa (CANDAN; HIZIROGLU; MCDONALD, 2010). Entretanto, segundo Bekhta, Hiziroglu e Shepelyuk (2009) e Candan, Hiziroglu e McDonald (2010), o lixamento não só aumenta o custo total da produção, mas também causa problemas com a poeira gerada. Ainda segundo os autores, a melhora da qualidade de colagem das lâminas de compensado pode ser conseguida pela ativação da superfície usando produtos químicos ou por processos mecânicos, como a densificação das lâminas.

O conceito de densificação da madeira surgiu em meados da Segunda Guerra Mundial (STAMM; CHIDESTER, 1947) com a finalidade de promover o aumento das propriedades mecânicas de produtos de madeira para uso estrutural. A densificação pode acontecer por processos somente mecânicos ou combinando-se o processo mecânico com calor, que é comumente chamado de termomecânico. Alguns autores observaram que a prévia densificação das lâminas melhorou as propriedades mecânicas e físicas do compensado. Bekhta e Marutzky (2007), tratando termomecanicamente

lâminas de beech (*Fagus* sp.), conseguiram obter uma redução no teor de umidade e na espessura em até 20% e 22%, respectivamente, e aumentaram a densidade em 26,7%, que passou de 0,79 g/cm³ para 1,0 g/cm³.

Bekhta, Niemz e Sedliacik (2012), tratando lâminas de birch (*Betula pubescens*), observaram que o tratamento termomecânico reduziu a rugosidade de lâminas entre 58% e 72%. Isso é apontado por alguns autores como causa da redução da quantidade de adesivo, tempo, temperatura e pressão na produção dos compensados e também como causa da melhora da resistência ao cisalhamento na linha de cola desses painéis (BEKHTA; HIZIROGLU; SHEPELYUK, 2009; CANDAN; HIZIROGLU; MCDONALD, 2010; KUROWSKA *et al.*, 2010; BEKHTA; NIEMZ; SEDLIACIK, 2012)

Acerca disso, o objetivo desse capítulo foi avaliar a influência do tratamento termomecânico de lâminas de amescla (*Trattinnickia burseraefolia*) nas propriedades físicas e mecânicas de compensados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CONFECÇÃO DOS COMPENSADOS

As lâminas de amescla foram previamente tratadas em uma prensa hidráulica INDUMEC com aquecimento por resistência elétrica. As temperaturas do tratamento foram 140 °C e 180 °C, tempo de um e dois minutos e pressão de 2,7 N/mm² de acordo com a Tabela 2.1. Foram confeccionados seis compensados por tratamento, montados com cinco lâminas de 250 mm x 250 mm cada, coladas perpendicularmente umas às outras, sendo uma de 3,5 mm de espessura no meio e duas de 1,5 mm de espessura em cada face (Figura 2.1).

Os compensados foram colados com a resina fenol-formaldeído na gramatura de 200 g/m². O adesivo foi formulado na proporção de 100:5:8:7, sendo estas respectivamente as porcentagens de resina, farinha de trigo, farinha de coco e água. A farinha de trigo e a de coco foram usadas como agente espessante, de acordo com a ficha técnica da resina fornecida pela empresa SIGroup Crios, fabricante do adesivo. A viscosidade da mistura foi de 840 cP, medida a temperatura ambiente com um viscosímetro digital, e o teor de sólidos foi de 59% medido em uma termobalança.

TABELA 2.1 – Delineamento experimental da produção dos compensados.

Tratamento	Nº de lâminas	Nº de lâminas/painel	Nº de painéis
Testemunha	30	5	6
140 °C/1 min./2,7 N/mm ²	30	5	6
140 °C/2 min./2,7 N/mm ²	30	5	6
180 °C/1 min./2,7 N/mm ²	30	5	6
180 °C/2 min./2,7 N/mm ²	30	5	6
Total	150		30



FIGURA 2.1 – Seção transversal do painel compensado com cinco lâminas.

Os compensados foram prensados em uma prensa hidráulica com pressão de 1,0 N/mm², temperatura de 150 °C e tempo de prensagem de 7,0 minutos. A temperatura e o tempo usados foram recomendados pelo fabricante do adesivo. Durante a prensagem foi colocado um termopar na linha de cola mais interna para medir a temperatura dentro de um painel de cada tratamento.

2.2 PRODUÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Depois de confeccionados os painéis foram colocados em câmara climatizada (20 °C±3 °C e 65%±1% de umidade relativa) até atingirem massa constante. Em seguida foram esquadrejados perdendo aproximadamente 1,5 cm em cada lado. Os corpos-de-prova (CPs) foram cortados para os ensaios físicos e mecânicos de acordo com o esquema da Figura 2.2. Primeiro os painéis foram cortados para retirada dos CPs para o ensaio de flexão estática. A área rompida durante a flexão foi descartada (A).

Depois os CPs foram sendo cortados de acordo com o esquema apresentado na Figura 2.2.

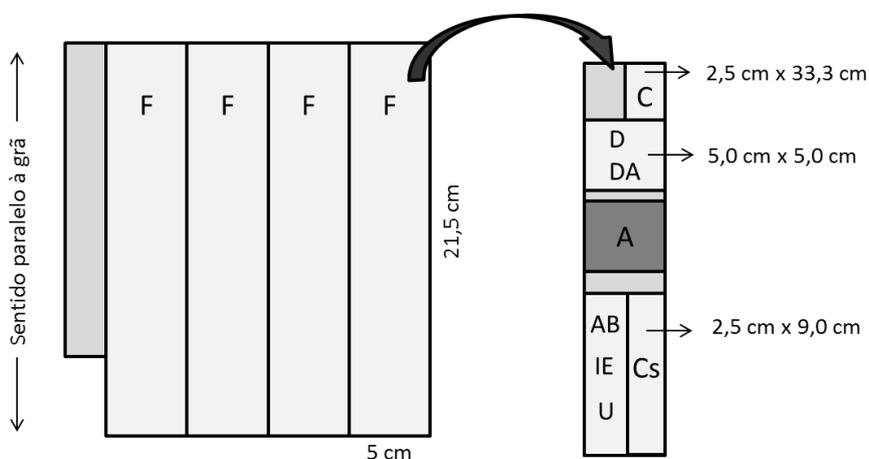


FIGURA 2.2 – Esquema de produção dos CPs dos painéis: U = teor de umidade; IE = inchamento em espessura; AB = absorção de água; F = flexão estática; C = compressão paralela; D = dureza Janka; DA = densidade aparente; A = área da flexão; Cs = cisalhamento da linha de cola.

2.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

Foram consideradas as seguintes propriedades físicas para caracterizar os compensados: densidade aparente (g/cm^3); teor de umidade de equilíbrio (TUE, %); inchamento em espessura em duas e 24 horas (IE, %), absorção de água em duas e 24 horas (AB, %) e taxa de não retorno em espessura (TNRE, %).

A densidade aparente foi feita usando 24 CPs por tratamento, de 50 mm x 50 mm, determinando o volume aparente de acordo com a norma ASTM D2395 (2007). A espessura foi medida em cinco pontos com um relógio comparador digital e os lados foram medidos em três pontos com paquímetro digital. O IE e AB foram obtidos de acordo com a norma ASTM D1037 (2006) em 24 CPs por tratamento, dimensão de 25 mm de largura x 90 mm de comprimento. Foram obtidos valores da espessura e da massa em duas horas e em 24 horas após a imersão dos CPs em água.

A TNRE foi medida nos CPs usados para o ensaio de IE e AB, depois de 30 dias de climatização até massa constante. Foi medida a espessura dos CPs para verificar a percentagem da espessura que não retornou à medida original após a perda da água para o ambiente. Como já explicado no capítulo 1, a TNRE mede o inchamento irreversível na madeira, causado pela liberação das tensões de compressão, que se acumulam

internamente quando o material é comprimido. O TUE foi obtido nos mesmos CPs, após a medição da TNRE, de acordo com a norma ASTM D4442 (2007).

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas avaliadas foram: flexão estática no sentido paralelo a grã com a obtenção o módulo de elasticidade (E_m) e módulo de ruptura (f_M) em N/mm^2 de acordo com a norma EN 310 (1993); resistência à compressão paralela ($f_{c,0}$, N/mm^2) de acordo com a norma ASTM D1037 (2006); dureza Janka (f_H , N) de acordo com a norma ASTM D1037 (2006) e resistência ao cisalhamento na linha de cola, teste seco, ($f_{gv,0}$, N/mm^2) de acordo com a norma EN 314-1 (2004). Esses ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios universal EMIC com capacidade de carga máxima de 200 kN.

Para a flexão estática foram usados 24 CPs por tratamento, de 50 mm de largura x 215 mm de comprimento com um vão de 165 mm. Esse ensaio caracterizou principalmente a rigidez e a resistência dos compensados e serviu para avaliar se a densificação resultou em ganhos significativos nessas propriedades. Para avaliar a $f_{c,0}$ foram usados também 24 CPs, com 25 mm de largura x 33 mm de altura. Para fazer o ensaio de dureza Janka os CPs de 50 mm x 50 mm foram colados dois a dois para satisfazer a exigência mínima de espessura da norma citada. Dessa forma, em cada tratamento foram feitas 12 repetições. Para o $f_{gv,0}$ foram usados 24 CPs de 25 mm de largura e 90 mm de comprimento.

2.5 ANÁLISE DE IMAGEM

Foi escolhido um CP de compressão paralela de cada tratamento para ser analisado. As imagens foram feitas primeiro em um Estereomicroscópio manual Leica modelo S8APO, com 75 cm de distância de trabalho e zoom apocromático de até 80x. As amostras foram analisadas na seção transversal do compensado, onde foi permitido comparar as linhas de cola dos CPs e visualizar a densificação geral do material.

Em seguida, as amostras foram analisadas na seção transversal e na superfície da capa do compensado com um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), de baixo vácuo (0,45 torr), usando detector de elétrons retro-espalhados (BSE) e tensão de 20 kV do Instituto Nacional de Criminalística da Polícia Federal, situado em Brasília. Com

essa análise foi possível medir o tamanho dos vasos e detectar com maior precisão se houve redução dos espaços vazios das lâminas densificadas.

2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As propriedades foram analisadas pelo teste de Dunnett, a 5% de significância, que compara as médias das propriedades entre os tratados e a testemunha, par a par. Para identificar o efeito do aumento de temperatura ou do tempo ou a interação entre os fatores nas propriedades, foi realizada uma Análise de Variância Fatorial, a 5% de significância, com dois fatores (temperatura e tempo) e dois níveis cada (140 °C e 180 °C; um minuto e dois minutos). Foi usado o modelo estatístico da Equação 2.1.

$$\gamma_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (2.1)$$

Onde:

μ = média global;

τ_i = efeito do i-ésimo nível do fator A;

β_j = efeito do nível j-ésimo nível do fator B;

$(\tau\beta)_{ij}$ = efeito da interação entre os fatores A e B;

ϵ_{ijk} = erro de cada observação sendo esses erros independentes entre si e com distribuição N de média 0 e variância σ^2 .

As propriedades mecânicas e a densidade aparente foram correlacionadas entre si pelo coeficiente de correlação de Pearson (r). Esse coeficiente varia de -1 a 1, onde o sinal indica a direção do relacionamento das variáveis e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Quanto mais perto de 1 (independente do sinal) maior será o grau de dependência estatística linear entre as variáveis. No outro oposto, quanto mais próximo de zero menor é a força dessa relação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS PAINÉIS

A Figura 3.1 mostra a evolução da temperatura interna média dos painéis. A curva da temperatura de 140 °C representa uma média da temperatura interna dos painéis produzidos com laminas tratadas a 140 °C e um minuto e 140 °C e dois minutos. Da mesma forma, foi produzida a curva da temperatura de 180 °C. Observou-se que a linha de cola interna dos painéis produzidos com as lâminas tratadas a 180 °C atingiu temperaturas maiores em menos tempo. Isso foi resultado da compressão mecânica do tratamento que reduziu os espaços vazios, aumentou a densidade e conseqüentemente aumentou a condutividade térmica dessas lâminas.

Observou-se que até os 70 segundos ocorreu um rápido aquecimento dos painéis. Nesse ponto, os painéis com lâminas tratadas a 140 °C tinham temperatura interna de 100,5 °C, os painéis de 180 °C já estavam com 103,5 °C e os de lâminas não tratadas estavam com temperatura média de 92,3 °C. Os 150 °C necessários para a cura do adesivo foram atingidos aos 6 minutos e 24 segundos nos painéis tratados a 180 °C e aos 6 minutos e 42 segundos nos painéis tratados à 140 °C. Os painéis com lâminas não tratadas, ao final dos 7 minutos da prensagem, não tinham atingido 150 °C na linha de cola mais interna.

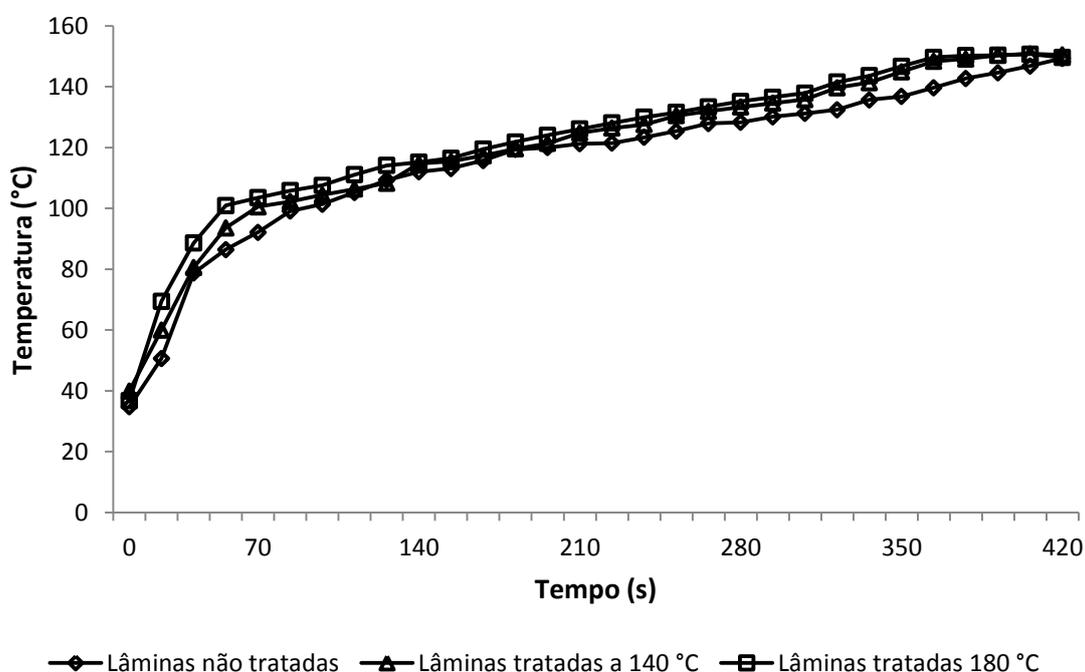


FIGURA 3.1 – Evolução da temperatura interna dos painéis compensados produzidos com lâminas não tratadas e tratadas termomecanicamente a 140 °C e 180 °C.

3.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

Os compensados produzidos com as lâminas não tratadas tiveram uma espessura média de 8,88 mm (Figura 3.2). Esse valor foi menor do que o recomendado pelo Programa Nacional de Qualidade da Madeira, PNQM, (ABIMCI, 2009) cuja espessura recomendada para compensados com cinco lâminas seja de 9,0 mm a 12 mm. A Figura 3.2 mostra que os compensados produzidos com lâminas densificadas são significativamente mais finos que a testemunha e que esses valores vão diminuindo com o aumento da intensidade (temperatura ou tempo) do tratamento. A diferença entre a espessura do compensado do tratamento 180 °C e dois minutos para a testemunha é de 10,36%.

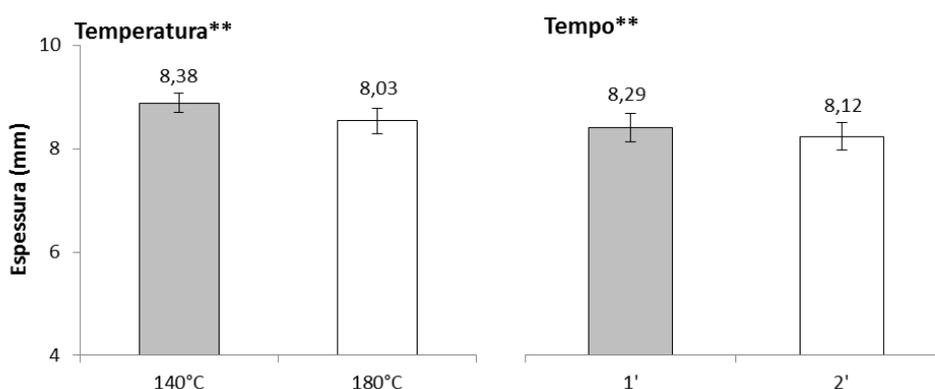
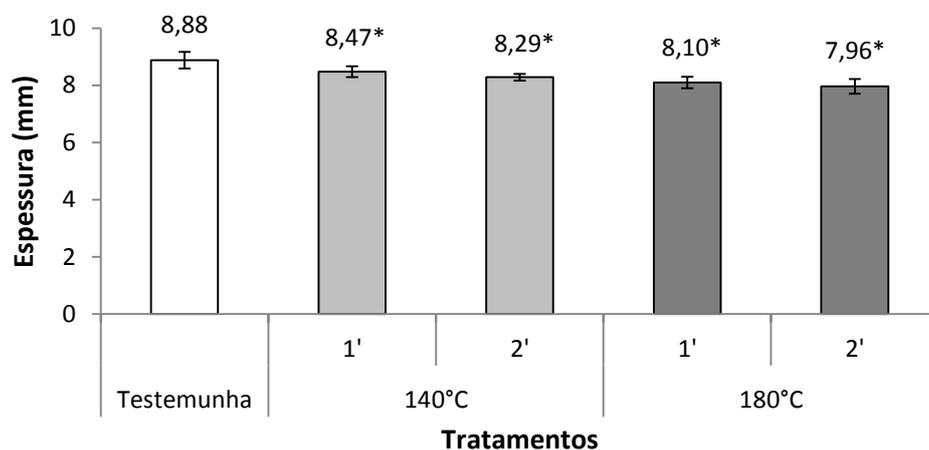


FIGURA 3.2 – Espessura dos compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.

*diferença significativa a 5% de significância pelo teste de Dunnett.** fator significativo na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Em relação à densidade dos compensados, a Figura 3.3 mostra que esta aumentou em até 8,2% no tratamento que usou lâminas tratadas a 180 °C por um minuto. Embora haja diferença entre os tratados e a testemunhas, a análise fatorial não identificou que o aumento da densidade tenha ocorrido em função do aumento da temperatura, ou do tempo (Figura 3.3 e Tabela B.5 no anexo). Esse resultado já tinha sido observado nas lâminas tratadas (Capítulo 2), e mostra que a aplicação do tratamento de 140 °C e um minuto foi suficiente para aumentar a densidade.

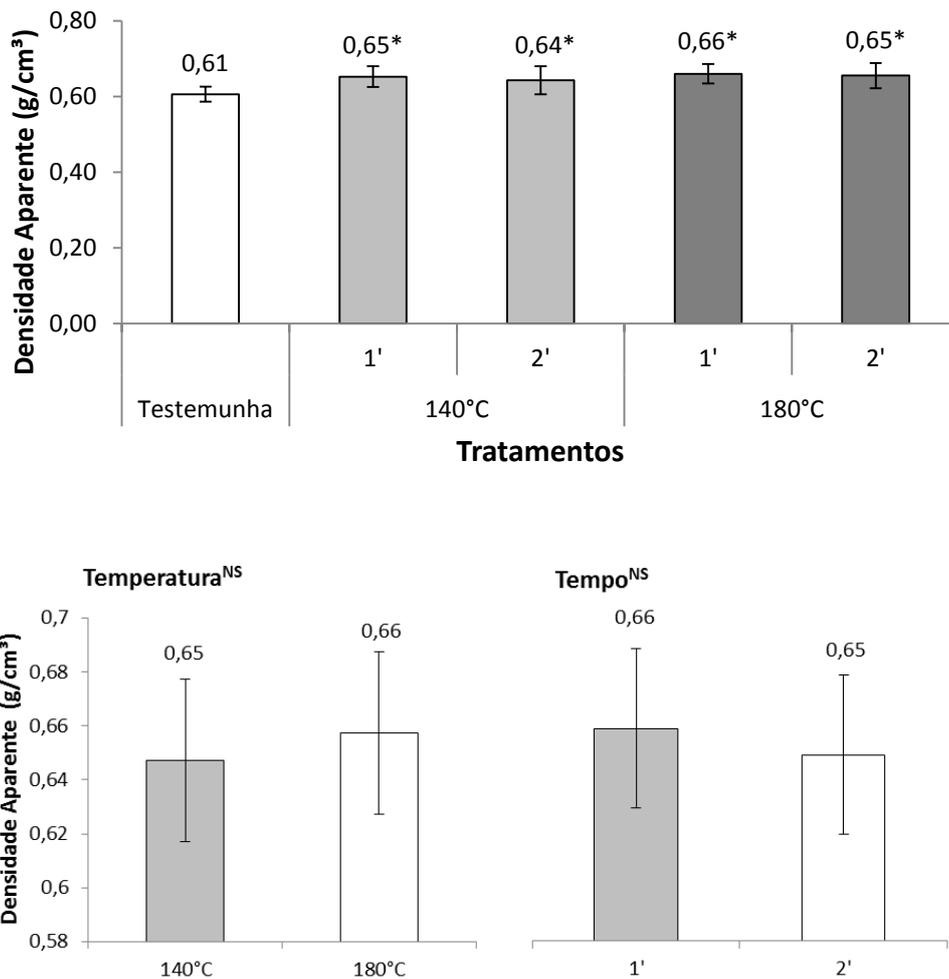


FIGURA 3.3 – Densidade aparente dos compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.

*diferença significativa a 5% de significância pelo teste de Dunnett. ^{NS} fator não significativo na análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

3.3 ESTABILIDADE DIMENSIONAL

Na Figura 3.4 estão os valores para IE dos compensados em duas e 24 horas. Em duas horas o IE foi significativamente menor na testemunha do que nos painéis tratados. O IE aumentou para 4,82% e 6,31% nos tratamentos de 140 °C e para 7,21% e 7,14% nos tratamentos de 180 °C. Apenas o IE duas horas dos compensados com lâminas tratadas a 140 °C e um minuto não foi diferente estatisticamente da testemunha.

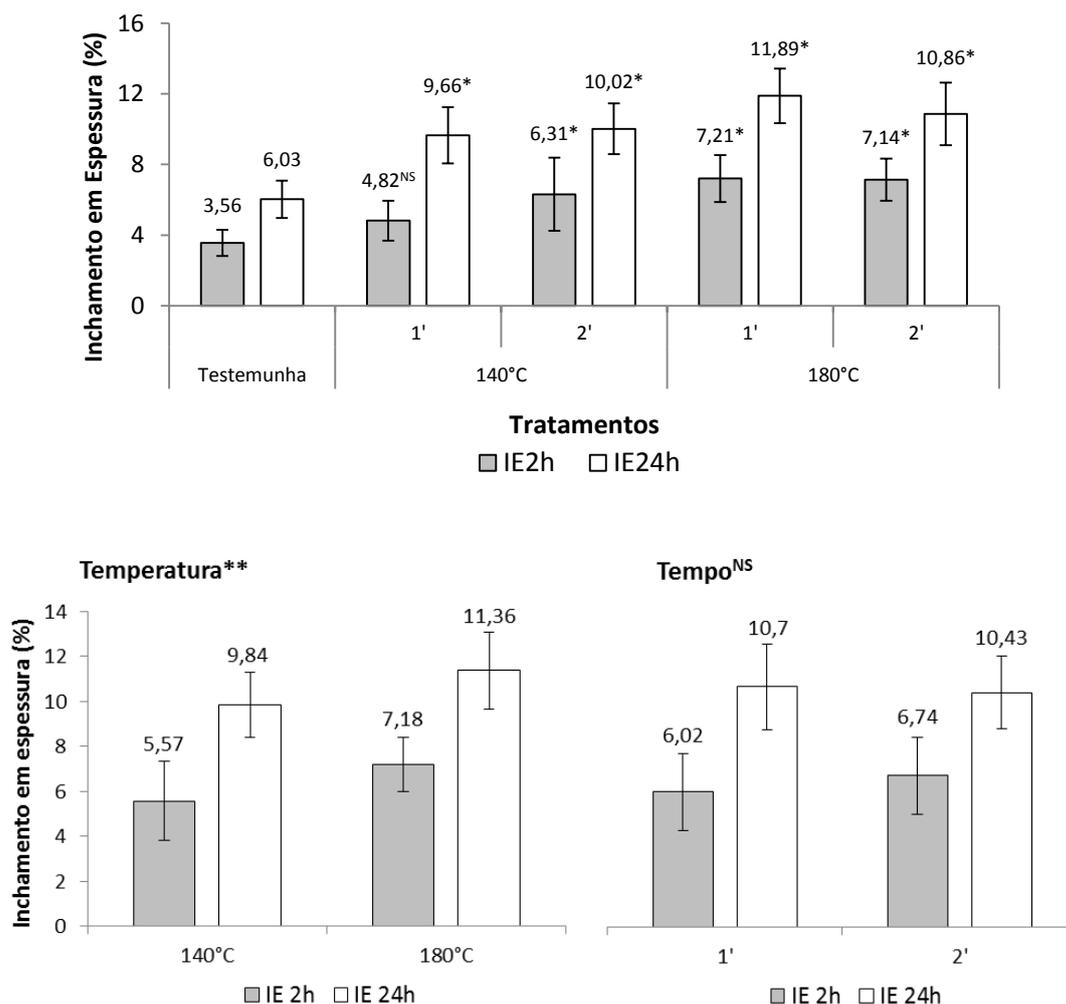


FIGURA 3.4 – Inchamento em espessura em duas horas e 24 horas dos painéis produzidos com lâminas tratadas termomecânicamente.

*.^{NS} diferença significativa e não significativa, respectivamente, a 5% de significância pelo teste de Dunnett. **.^{NS} fator significativo e não significativo, respectivamente, pela análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Após 24 horas, o IE da testemunha aumentou para 6,03%, nos tratamentos de 140 °C aumentou para 9,66% e 10,02% e nos de 180 °C aumentou para 11,89% e 10,86% (Figura 3.4). Todos os tratados agora tiveram IE estatisticamente maior que a

testemunha. Os valores dos tratados, tanto em duas horas quanto em 24 horas foram maiores que a testemunha devido ao inchamento causado pela liberação das tensões de compressão. Esse efeito foi significativamente maior quando a temperatura de tratamento aumentou para 180 °C (Figura 3.4 e Tabela B.5 no anexo).

Em painéis compensados produzidos com lâminas de paricá (*Schizolobium amazonicum*) tratadas termomecanicamente e estudadas por Arruda *et al.* (2011), os valores de IE foram um pouco menores que os encontrados neste trabalho. Os autores trataram as lâminas por 5, 10 e 15 minutos, a 150 °C e pressão de 1,0 N/mm². Os compensados com lâminas tratadas tiveram IE em 24 horas de 5,14%, 7,08% e 4,16%, respectivamente, enquanto que o IE 24 horas dos compensados de amescla variou de 9,6% a 11,89%.

Comparando esse resultado com o das lâminas no Capítulo 2, observou-se que o IE das lâminas foi maior que o dos compensados. Para as lâminas só o IE 2h foi calculado, e os valores variaram entre 11,72% a 14,94% enquanto que os valores do IE 2h dos compensados foram bem menores, variando de 4,82% a 7,21%. Isso pode ser explicado pela aplicação do adesivo que preencheu os espaços que ainda estavam vazios, diminuindo o inchamento higroscópico do compensado. Outra explicação é de que a força da colagem tenha sido suficiente para impedir que houvesse grande expansão das lâminas. Ou ainda, podem ter ocorrido as duas situações simultaneamente. De qualquer forma, o aumento do inchamento em espessura foi um efeito negativo causado pelo tratamento, pois prejudicou a estabilidade dimensional dos compensados.

A Figura 3.5 mostra a TNRE para os compensados. Observa-se que os valores da TNRE dos compensados tratados são significativamente maiores que a testemunha, que teve uma TNRE de 3,50%. 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.

A análise fatorial para a TNRE mostrou que somente a interação entre os fatores foi significativa (Figura 3.5 e Tabela B.5 no anexo). Observou-se que usando uma menor temperatura e um menor tempo consegue-se uma menor TNRE (6,51%). Aumentando a temperatura para 180 °C tem-se um efeito maior para o aumento da TNRE (7,97%) que quando o tempo aumenta para dois minutos (7,52%).

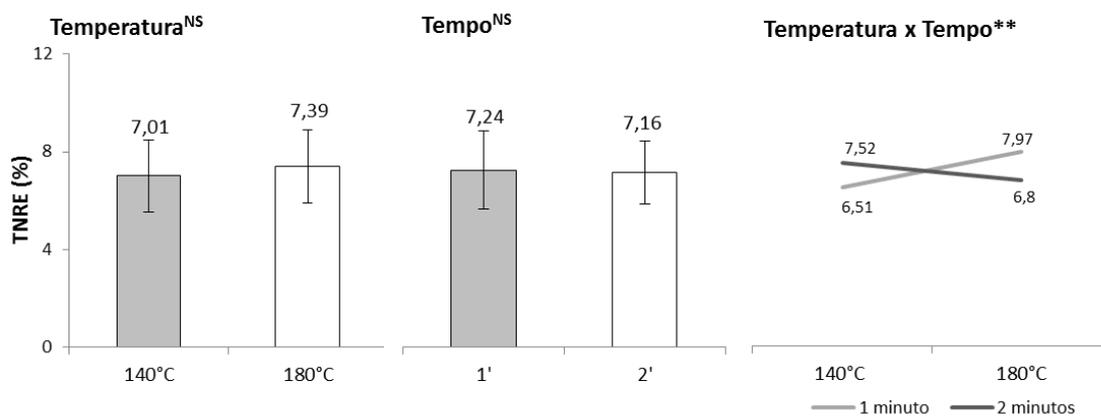
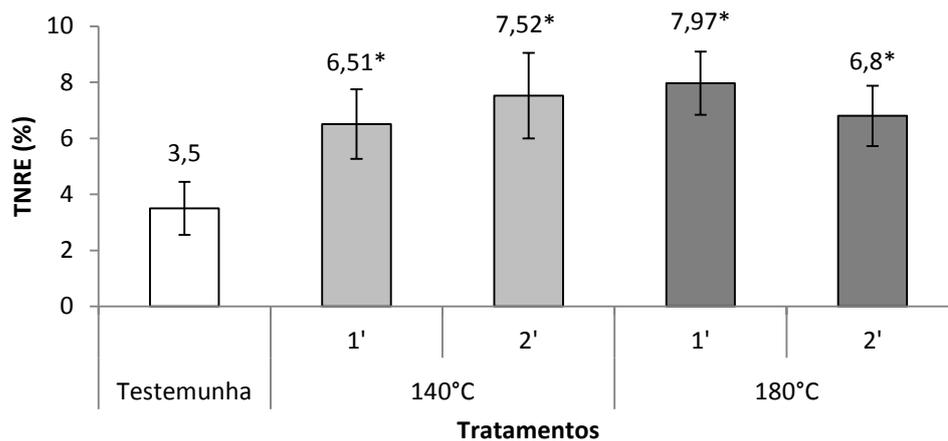


FIGURA 3.5 – Taxa de não retorno em espessura dos painéis produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.

*^{NS} diferença significativa e não significativa, respectivamente, a 5% de significância pelo teste de Dunnett. **^{NS} fator significativo e não significativo, respectivamente, pela análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

A Figura 3.6 mostra os valores de AB em duas e 24 horas. Em duas horas os únicos valores significativamente maiores que a testemunha foram os dos tratamentos de dois minutos (20,14% e 21,36%, respectivamente a 140 °C e 180 °C). Os demais tratamentos não se diferenciaram da testemunha, que absorveu 17,62% de água. Na AB 24 horas o único tratamento que se diferenciou estatisticamente da testemunha foi o de 140 °C e dois minutos, cujo valor foi de 56,97%.

A análise fatorial indicou que para a AB duas horas, o efeito do aumento da temperatura ou do tempo foram significativos (Figura 3.6 e Tabela B.5 no anexo). Para a AB 24 horas o aumento do tempo e a interação entre os dois fatores foi significativo. Pelo gráfico da interação observou-se que o aumento do tempo afetou muito mais a AB que o aumento da temperatura para 180 °C.

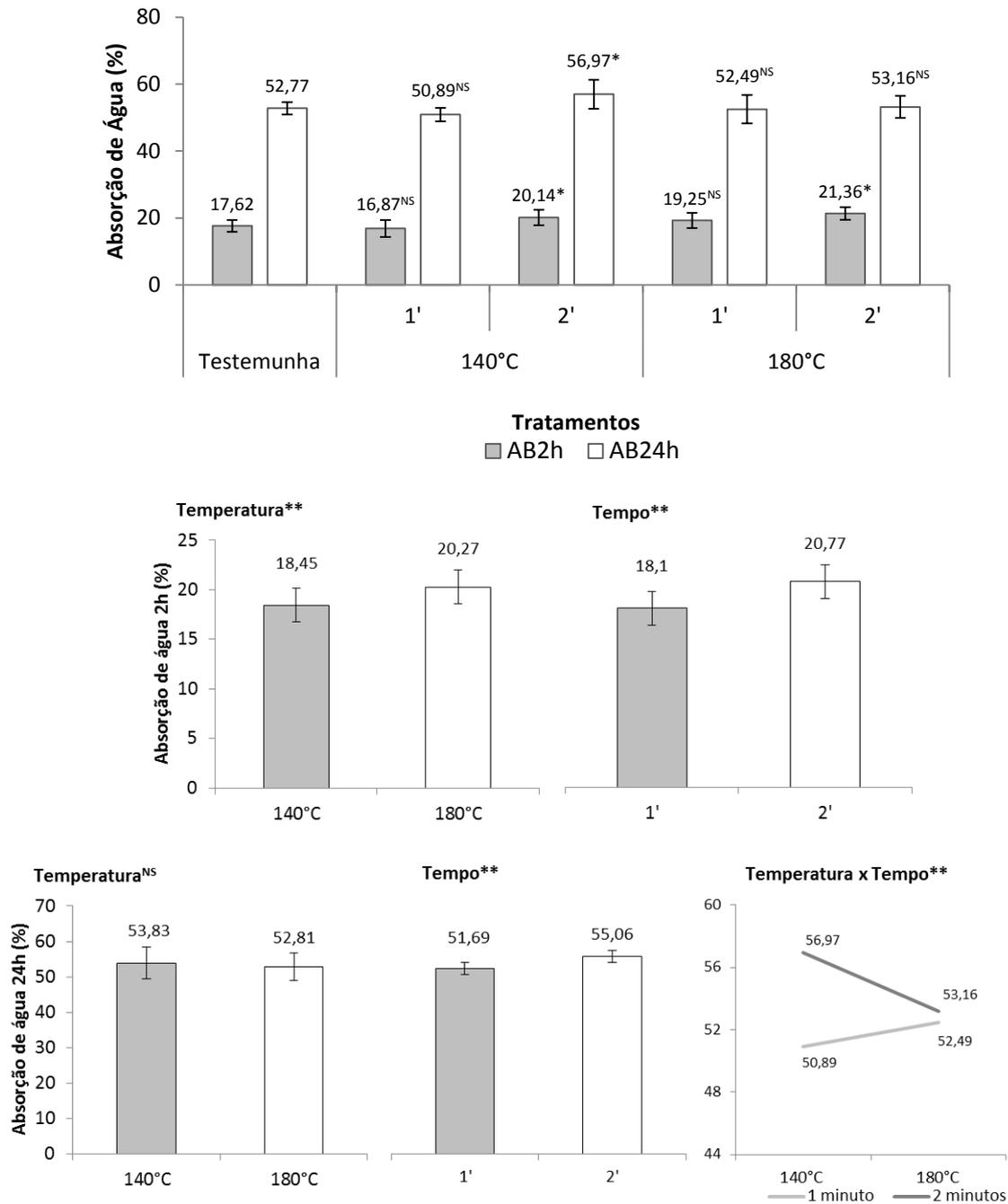


FIGURA 3.6 – Absorção de água em duas horas e 24 horas dos painéis produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.

*.NS diferença significativa e não significativa, respectivamente, a 5% de significância pelo teste de Dunnett. **.NS fator significativo e não significativo, respectivamente, pela análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

No entanto, apesar do tratamento ter melhorado a molhabilidade da superfície das lâminas e reduzido os espaços vazios pela densificação a AB ainda foi maior que a testemunha. Isso pode ter acontecido porque quando houve a expansão total do painel

durante a imersão em água, os vasos que estavam achatados foram reabertos e mais água foi absorvida pelo painel. Em comparação com as lâminas, os valores de AB dos compensados são inferiores, da mesma forma que foi observado para o inchamento em espessura.

Arruda *et al.* (2011) observaram que os valores da AB dos compensados tratados diminuíram em relação a testemunha, mesmo a análise estatística não indicando diferença significativa entre os valores. A testemunha teve AB em 2 horas de 36,82% enquanto que a AB nos compensados tratados variou de 32,23% a 33,04%. Essa redução também foi percebida na AB 24 horas onde a testemunha teve 77,35% e os tratados variaram de 75,04% a 76,26%.

Grzeskiewicz, Borysiuk e Jaskółowski (2009) também observaram que a AB foi menor em compensados produzidos com lâminas tratadas termicamente por duas horas a 160 °C, 190 °C e 220 °C. A testemunha teve AB duas horas de 17,5% enquanto que os valores para essas temperaturas foram diminuindo com o aumento da temperatura (17%, 12,7% e 11,4%, respectivamente). Na AB 24 horas os valores também diminuíram com o aumento da temperatura e no geral foram mais baixos que os dos compensados de amescla. Na testemunha o valor foi de 38,4% e nos tratamentos citados o valor foi diminuindo (37,3%, 32% e 27,2%).

Em relação à higroscopia dos compensados os resultados do TUE mostraram que este foi menor nos tratamentos de 180 °C (Figura 3.7 e Tabela B.3 no anexo). Em relação à testemunha, o TUE diminuiu 5,93% e 3,82%, respectivamente para os tratamentos de 180 °C e um minuto e dois minutos. O aumento da temperatura para 180 °C foi significativo para essa redução (Figura 3.7 e Tabela B.5 no anexo).

O gráfico do efeito da temperatura mostra que apenas aumentando a temperatura teve-se uma redução de 6,4% no TUE. Pelo gráfico da interação observou-se que quando houve aumento no tempo e na temperatura a redução foi a mesma, ou seja, não justificando para isso o uso do tratamento de dois minutos.

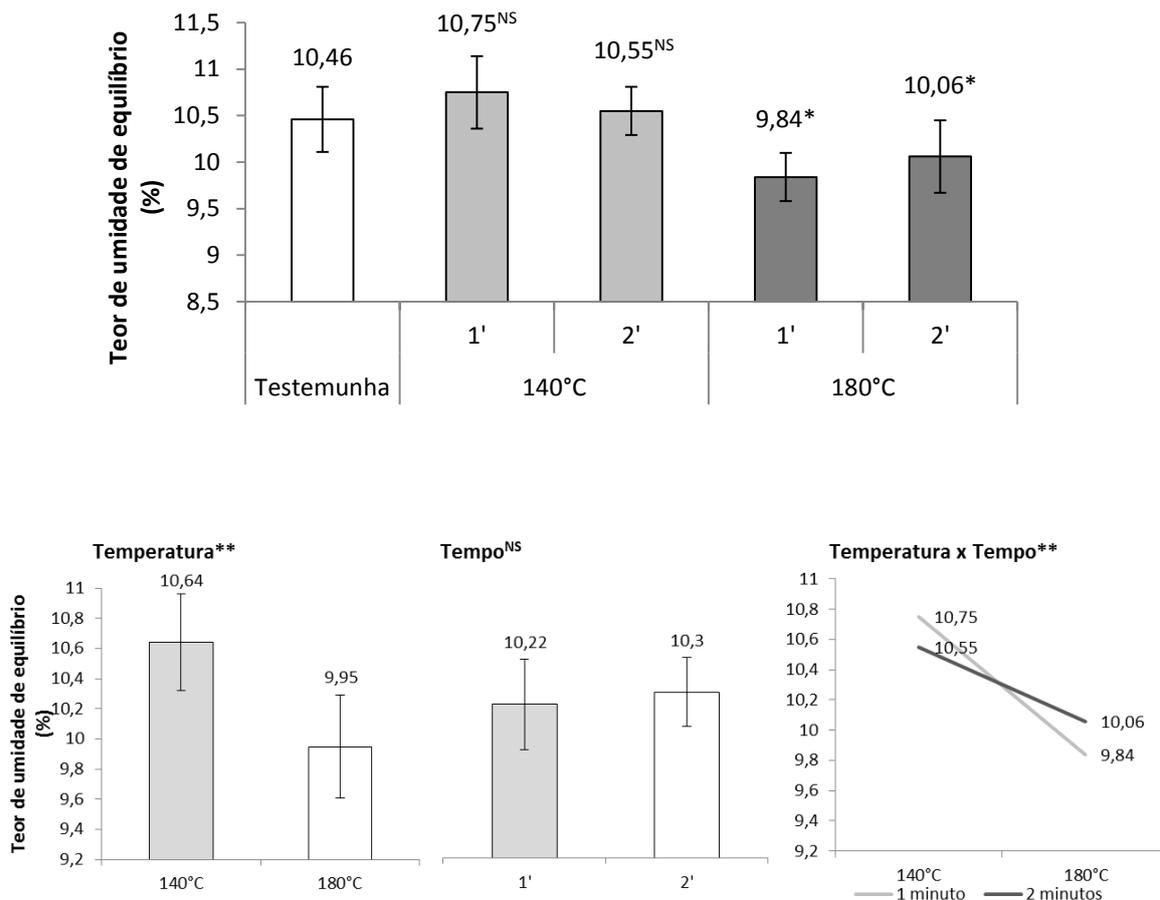


FIGURA 3.7 – Teor de umidade de equilíbrio para os compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente

*.NS diferença significativa e não significativa, respectivamente, a 5% de significância pelo teste de Dunnett. **.NS fator significativo e não significativo, respectivamente, pela análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

A redução do TUE, segundo Del Menezzi e Tomaselli (2006) é muito vantajosa e indica que os painéis são mais estáveis a mudanças de umidade, pois estão menos susceptíveis à adsorção de água. A principal causa da redução do TUE é a perda de polímeros higroscópicos, como a hemicelulose, que são mais sensíveis ao aumento da temperatura (BOONSTRA; TJEERDSMA, 2006; ROWELL; YOUNGS, 1981). Essa degradação de polímeros pode ser quantificada pela perda de massa e que nas lâminas foi de 0,22% e 0,38%, respectivamente para os tratamentos de 180 °C e um minuto e 180 °C e dois minutos. Apesar de ter sido aparentemente pequena, pode ter sido suficiente para diminuir a higroscopicidade do material.

3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades da flexão estática, módulo de elasticidade e ruptura, foram pouco afetadas pelo tratamento termomecânico. A Figura 3.8 mostra que o E_m para os compensados não tratados foi de 8604 N/mm^2 . Iwakiri *et al.* (2001) encontraram valores menores de E_m , entre 4548 N/mm^2 e 6356 N/mm^2 , respectivamente para compensados semelhantes não tratados de *Pinus tecunumannii* e *Pinus oocarpa*. Em compensação, os compensados de 11 espécies do gênero *Eucalyptus* analisados por Bortoletto Júnior (2003) tiveram uma rigidez superior, no valor médio de 14918 N/mm^2 .

Os compensados tratados apresentaram valores maiores que a testemunha, mas somente no tratamento mais severo foi observada diferença estatística entre o tratado e a testemunha. O aumento foi de 12,2% na resistência e segundo a análise de variância apenas o aumento do tempo para dois minutos foi significativo (Figura 3.8 e Tabela B.6 no anexo). No caso, os tratamentos de $140 \text{ }^\circ\text{C}$ são estatisticamente iguais à testemunha, o que inviabiliza de certa forma o uso dessa temperatura se o objetivo for o aumento da rigidez. Dessa forma, para garantir um resultado significativo nessa propriedade o recomendado seria o uso da temperatura de $180 \text{ }^\circ\text{C}$ com o tempo de dois minutos, visto que esse tempo contribuiu significativamente para o aumento dessa propriedade.

Em relação à resistência (f_M), o valor na testemunha foi de $81,2 \text{ N/mm}^2$, valor superior ao encontrado por Iwakiri *et al.* (2001) em compensados semelhantes e não tratados de *P. tecunumannii* e *P. oocarpa*. Após o tratamento, os compensados de amescla apresentaram alguma melhora da resistência em comparação com a testemunha (Figura 3.8). O maior incremento foi de 6% que ocorreu no tratamento de $140 \text{ }^\circ\text{C}$ e dois minutos, seguido do tratamento de $180 \text{ }^\circ\text{C}$ e um minuto que apresentou aumento de 3,4%.

Embora esses aumentos tenham ocorrido, o teste de Dunnett não identificou diferença entre nenhum dos tratados em relação à testemunha (Tabela B.4 no anexo). A análise fatorial também não identificou que o aumento da temperatura para $180 \text{ }^\circ\text{C}$ ou do tempo para dois minutos tenha causado efeito no f_M (Tabela B.6 no anexo).

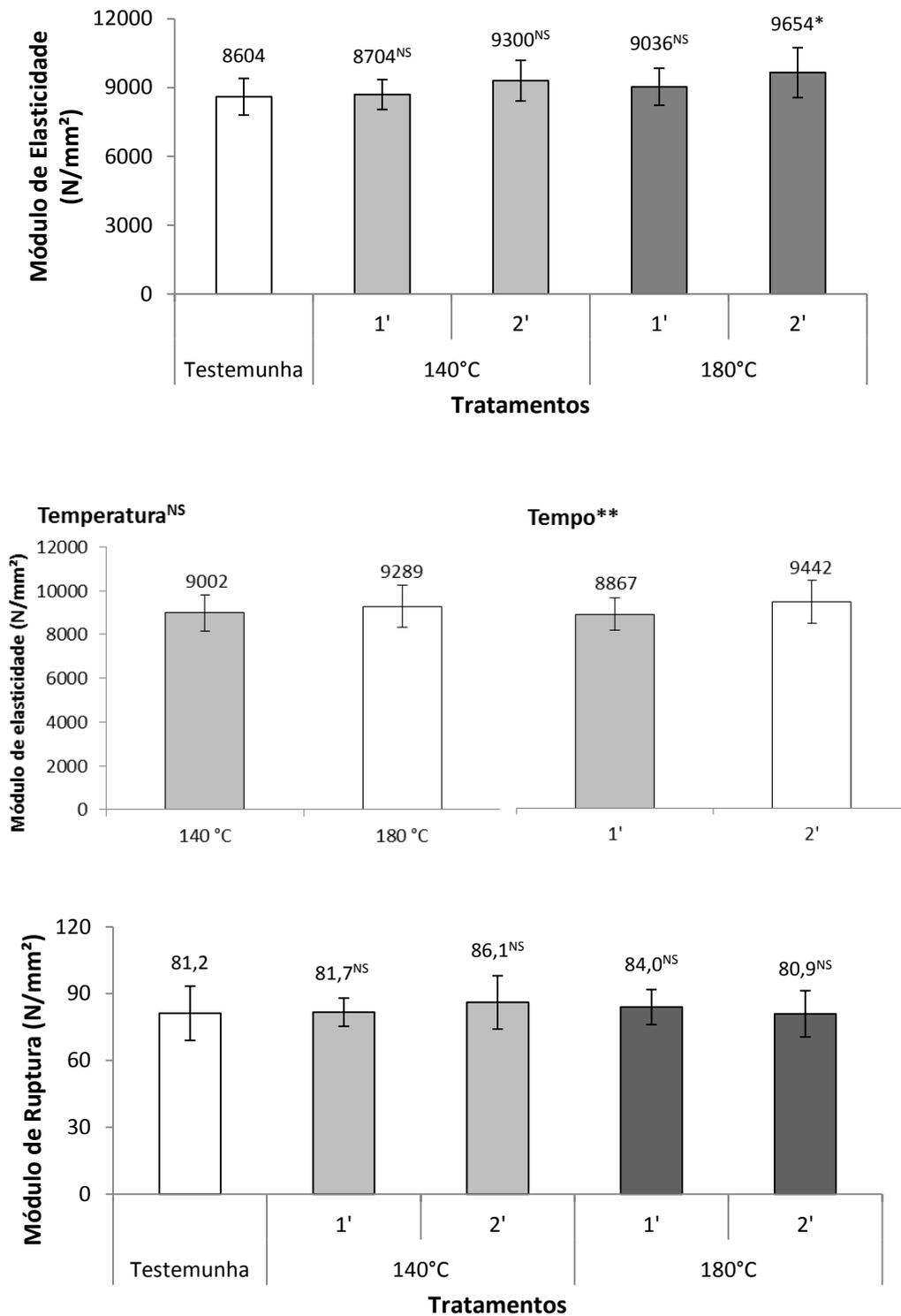


FIGURA 3.8 – Módulo de elasticidade e de ruptura dos compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.

*.NS diferença significativa e não significativa, respectivamente, a 5% de significância pelo teste de Dunnett. **.NS fator significativo e não significativo, respectivamente, pela análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Por outro lado, a resistência à flexão não diminuiu significativamente, o que poderia ter acontecido em decorrência da degradação térmica dos polímeros. Yildiz, Gezer e Yildiz (2006) comentam que a diminuição das propriedades de resistência estão relacionadas com a taxa de degradação e a perda de massa depois de tratamentos térmicos. A queda na resistência está atribuída principalmente a reações de depolimerização dos polímeros da madeira, principalmente das hemiceluloses, que são menos estáveis que a lignina e mais sensíveis à temperatura. Segundo Hillis (1984) mudanças na composição ou perda de hemiceluloses podem contribuir significativamente para mudanças nas propriedades de resistência da madeira tratada a altas temperaturas.

Além disso, esses autores comentam que em tratamentos térmicos o módulo de ruptura é mais afetado do que o módulo de elasticidade, o que não foi observado nesse trabalho, visto que não houve piora do f_M . Isso mostrou que o uso do tratamento termomecânico das lâminas foi vantajoso para a flexão estática, pois deixou o material mais resistente à deformação elástica sem diminuir a carga de ruptura.

A dureza dos compensados aumentou com o tratamento termomecânico. Na testemunha o valor de f_H foi de 4054 N e aumentou em 20,4% com a aplicação do tratamento menos severo (Figura 3.9). O teste de Dunnett verificou que três tratamentos foram significativamente superiores em dureza que a testemunha: 140 °C um e dois minutos e 180 °C e um minuto (Tabela B.4 no anexo). Dentre os tratados, o menor valor foi encontrado no tratamento mais severo, 4610 N, mas que ainda foi 13,7% maior que a testemunha.

A análise fatorial, no entanto, não identificou que a f_H tenha sido influenciada pelo aumento do tempo para dois minutos ou da temperatura para 180 °C (Figura 3.9 e Tabela B.6 no anexo). Isso mostrou que o uso do tratamento de 140 °C e um minuto foi suficiente para aumentar a dureza dos compensados, não justificando o uso do tratamento mais severo para conseguir um resultado significativo.

A resistência à compressão paralela também apresentou aumento em relação à testemunha em todos os tratamentos (Figura 3.10). Esse aumento foi significativo para os tratamentos de 180 °C, onde em um minuto o $f_{c,0}$ foi de 42,9 N/mm² e em dois minutos foi de 43,6 N/mm², o que representou um aumento de 6,7% e 8,3%, respectivamente (Tabela B.4 no anexo). Narayanamurti e Kaul (1966) verificaram que o tratamento termomecânico de lâminas proporcionou o aumento da $f_{c,0}$ em painéis em até 46,92%. Como os valores dos tratamentos de 140 °C são estatisticamente iguais à

testemunha essa temperatura não foi ideal para aumentar a $f_{c,0}$. O ideal para isso foi o uso do tratamento de 180 °C e um minuto, visto que o aumento do tempo para dois minutos não teve influência significativa (Figura 3.10 e Tabela B.6 no anexo).

Sem a influência da compressão, alguns autores observaram que a resistência da madeira caiu quando foram tratadas termicamente. Isso foi observado por Yildiz, Gezer e Yildiz (2006), onde a $f_{c,0}$ caiu cerca de 40% quando o tratamento térmico atingiu 200 °C durante 10 horas. Gündüz *et al.* (2009) correlacionaram a queda da $f_{c,0}$ com a perda de densidade da madeira durante o tratamento térmico e verificaram que após 12 horas a 210 °C a $f_{c,0}$ diminuiu 34,7% em função de 16% de perda da densidade.

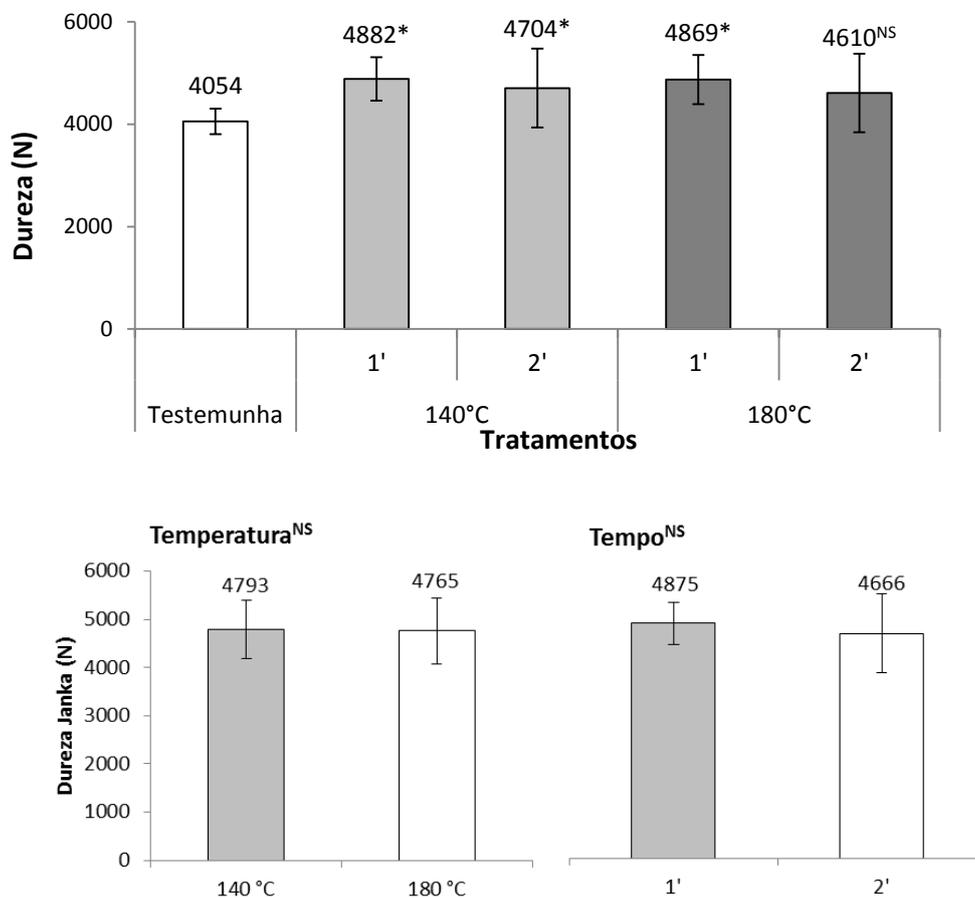


FIGURA 3.9 – Dureza Janka dos compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.

*.^{NS} diferença significativa e não significativa, respectivamente, a 5% de significância pelo teste de Dunnett. ^{NS} fator não significativo pela análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

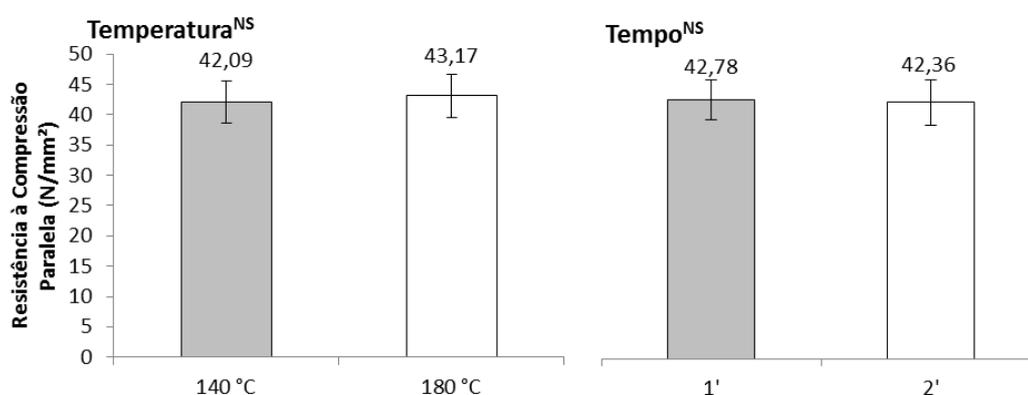
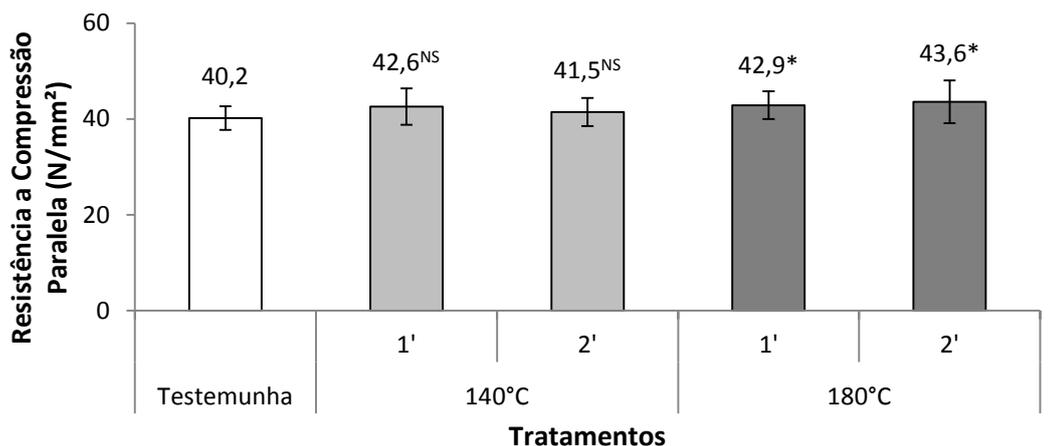


FIGURA 3.10 – Compressão paralela dos compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.

*.NS diferença significativa e não significativa, respectivamente, a 5% de significância pelo teste de Dunnett. NS fator não significativo pela análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

Outros autores como Gündüz, Korkut e Korkut (2008) e Korkut, Akgül e Dünder (2008) também observaram essa relação para a dureza. Korkut, Akgül e Dünder (2008) observaram que a dureza caiu 41% em um tratamento térmico com amostras de *Pinus sylvestris* após 10 horas a 180 °C. Usando a mesma temperatura e tempo, Gündüz, Korkut e Korkut (2008) observaram que a redução da dureza foi de 32,4% para amostras de *Pinus nigra*.

Assim como nas outras propriedades mecânicas, a resistência ao cisalhamento na linha de cola dos compensados aumentou depois do tratamento (Figura 3.11). Na testemunha a $f_{gv,0}$ foi de 3,35 N/mm² e aumentou 41% quando foi usado o tratamento mais severo. O segundo maior aumento ocorreu no tratamento de 140 °C e dois minutos, onde a $f_{gv,0}$ aumentou 21,8%. Apesar do aumento em resistência ter ocorrido em todos os tratamentos, o teste de Dunnett identificou que somente os tratamentos que

usaram dois minutos foram diferentes significativamente da testemunha (Tabela B.4 no anexo).

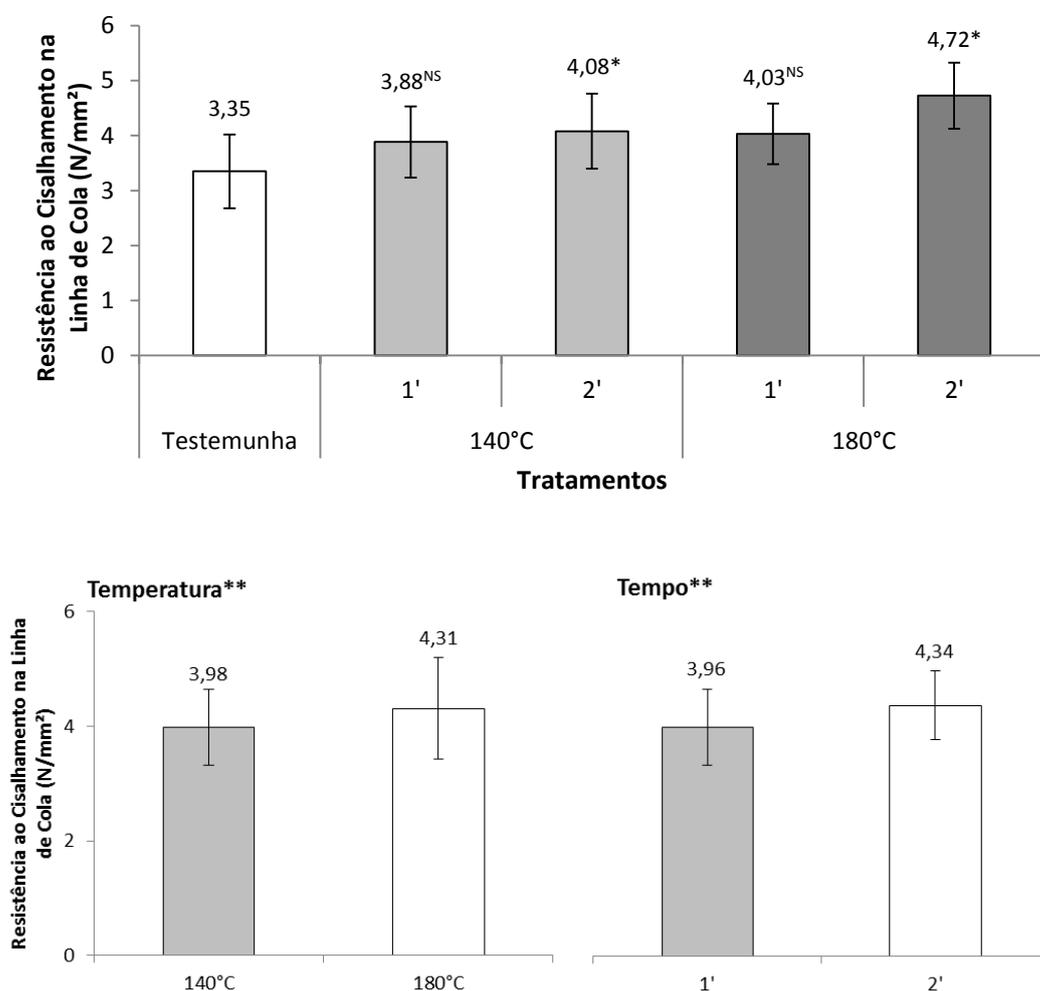


FIGURA 3.11 – Resistência ao cisalhamento na linha de cola para os compensados produzidos com lâminas tratadas termomecanicamente.

*.NS diferença significativa e não significativa, respectivamente, a 5% de significância pelo teste de Dunnett. **fator significativo pela análise fatorial a 5% de significância. As barras acima das colunas indicam o desvio padrão.

O aumento na $f_{gv,0}$ foi influenciado significativamente pelo aumento da temperatura para 180 °C ou pelo aumento do tempo para dois minutos, segundo a análise fatorial na Tabela B.6 no anexo. O aumento da temperatura ou do tempo também foram responsáveis pela redução significativa da rugosidade. De acordo outros estudos a melhoria da rugosidade melhora a qualidade da colagem aumentando a $f_{gv,0}$ (AYDIN; COLAKOGLU, 2005; BEKHTA; NIEMZ; SEDLIACIK, 2012; CANDAN; HIZIROGLU; MCDONALD, 2010; NEESE; REEB; FUNCK, 2004). Como visto no

Capítulo 2, a rugosidade das lâminas de amescla diminuiu em até 43,4%, o que contribuiu para a redução de pontos de tensão entre a superfície da lâmina e da cola.

A rugosidade, porém não pode diminuir a ponto de deixar a superfície da lâmina inativada, prejudicando a adesão entre o adesivo e a madeira (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). Isso foi observado por Bekhta, Niemz e Sedliacik (2012) quando lâminas tratadas termomecanicamente acima de 150 °C produziram compensados com baixa $f_{gv,0}$. Para lâminas tratadas acima dessa temperatura, esses autores recomendaram que a gramatura do adesivo fosse reduzida para não diminuir a $f_{gv,0}$.

Grzeskiewicz, Borysiuk e Jaskółowski (2009) tratando lâminas de beech (*Fagus* sp.) até 160 °C verificaram que não houve perda da $f_{gv,0}$ nos compensados. Porém, aumentando a temperatura para 190 °C e 220 °C a resistência caiu de 3,8 N/mm² (valor da testemunha) para 2,1 N/mm² e 0,6 N/mm², respectivamente. Os autores usaram uma gramatura de 160 g/m² para colar os compensados, que deveria ter sido menor à medida em que aumentou-se a temperatura.

Outra análise complementar dos dados da $f_{gv,0}$ é a análise visual da qualidade da colagem. Observou-se que todos os CP's tiveram 100% de falha na madeira, exceto por uma amostra CP no tratamento de 140 °C e dois minutos que teve 90% de falha na madeira. Essa é uma classificação visual, baseada no anexo A da norma EN 314-1 e apesar de ser subjetiva, transmite a ideia de aderência entre a madeira e a cola. Quando ocorre a falha totalmente na madeira tem-se uma situação em que a resistência da linha de cola é mais forte que a resistência da madeira, indicando boa aderência (Figura 3.12).



FIGURA 3.12 – CP com 100% de falha na madeira no ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola.

Kurowska *et al.* (2010) também observaram que os compensados de lâminas tratadas de *Pinus sylvestris* tiveram 100% de falha na madeira no ensaio de

cisalhamento na linha de cola. No entanto, esses resultados foram atingidos usando uma temperatura menor de 105 °C, pressão de 1,8 N/mm², um tempo de apenas 30 segundos e linha de cola mais fina com 120 g/m².

É comum que durante tratamentos térmicos ou secagens com temperaturas mais elevadas a superfície da madeira apresente baixa rugosidade a ponto de ficar inativada. Isso pode ser identificado principalmente pela baixa qualidade da colagem. No entanto, os dados obtidos nesse estudo mostraram que até 180 °C não houve prejuízo da colagem das lâminas.

Para correlacionar as propriedades mecânicas entre si e também com a densidade, a Tabela 3.1 mostra os valores para o coeficiente de correlação de Pearson (r). A partir desse coeficiente foi possível identificar que a densidade se correlacionou significativamente com todas as propriedades mecânicas. O maior r foi entre a densidade e a $f_{c,0}$, cujo valor foi de 0,624. Esse valor indicou que a correlação entre essas variáveis foi moderada e positiva, ou seja, o aumento da densidade aumentou a $f_{c,0}$ na mesma direção. A regressão entre essas variáveis é apresentada na Figura 3.13.

TABELA 3.1 – Coeficiente de correlação de Pearson para a densidade aparente e as propriedades mecânicas.

Propriedade	Densidade	$f_{c,0}$	$f_{gv,0}$	f_M	E_m	Dureza
Densidade	1					
$f_{c,0}$	0,624**	1				
$f_{gv,0}$	0,310**	0,261**	1			
f_M	0,395**	0,357**	0,113	1		
E_m	0,232*	0,248**	-0,061	0,392**	1	
Dureza	0,314*	0,247	0,271	0,212	0,044	1

*coeficiente r significativo a 5% de significância; ** coeficiente r significativo a 1% de significância.

A $f_{c,0}$ também esteve correlacionada positivamente com a $f_{gv,0}$, embora a força dessa relação tenha sido fraca (0,261). Isso significou que uma alta resistência na colagem correspondeu aos maiores valores de compressão. A $f_{gv,0}$, a dureza, e as variáveis da flexão estática, E_m e f_M , também estiveram positivamente correlacionadas com a densidade, indicando que a densificação teve relação, mesmo que fraca, com o aumento dessas propriedades mecânicas.

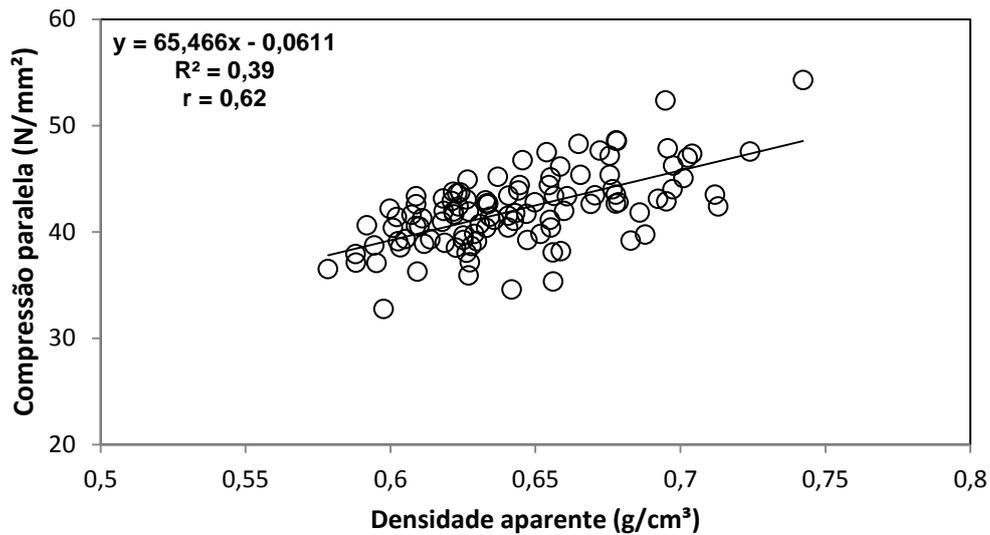


FIGURA 3.13 – Regressão linear entre a densidade aparente e a compressão paralela.

3.5 ANÁLISE DE IMAGEM

As imagens da Figura 3.14 mostram, em aumento de 20x no estereomicroscópio, o detalhe transversal de três das cinco lâminas do compensado. Observou-se pelas imagens que a testemunha tinha linha de cola mais irregular, causada pela rugosidade da madeira não tratada. Os vasos também possuíam formato mais cilíndrico, o que demonstra o não adensamento dos elementos da madeira. A imagem da amostra tratada mostra uma melhora significativa na linha de cola, que ficou mais fina e mais contínua. Os vasos da amostra tratada também ficaram visivelmente comprimidos.

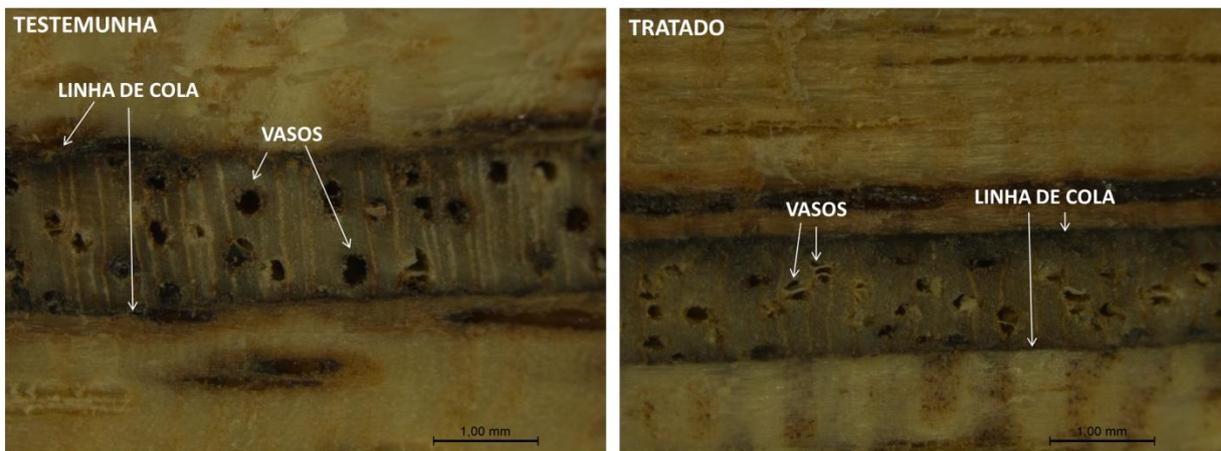


FIGURA 3.14 – Imagens do estereomicroscópio (20x) para análise geral da densificação e da linha de cola dos compensados. Escala: 1,0 mm

Com as imagens do MEV o adensamento ficou mais evidente (Figura 3.15). Na testemunha de fato os vasos são mais cilíndricos que na imagem da amostra tratada. Nesta, observou-se que a compressão achatou a parede dos vasos, porém sem ocasionar o colapso. Isso é bom para preservar a estrutura interna da madeira, garantindo que as propriedades mecânicas não sejam afetadas. Para quantificar a redução do tamanho dos vasos, foram medidos os diâmetros de cinco vasos, tomados aleatoriamente, na testemunha e no tratado. A média do diâmetro dos vasos na testemunha foi de 224,98 μm enquanto que no tratamento mais severo essa média foi de 88,72 μm .

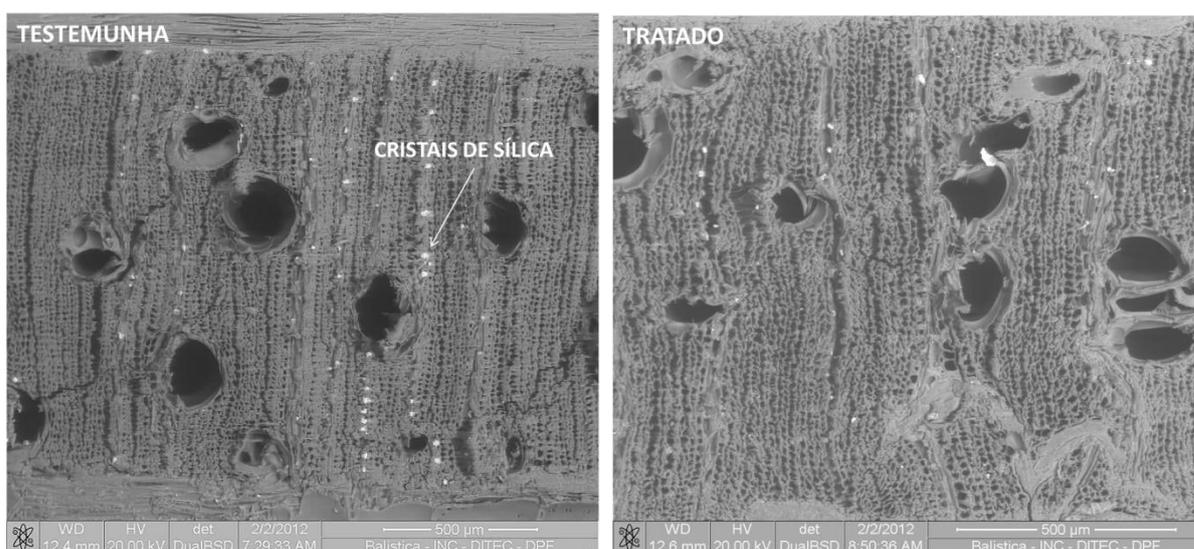


FIGURA 3.15 – Imagens feitas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) da seção transversal dos compensados, comparando a amostra da testemunha com uma amostra tratada. Escala: 500 μm e WD 12,6 mm.

A análise no MEV também encontrou cristais ao longo das fibras da madeira de amescla (Figura 3.15). A composição química foi confirmada pelo MEV, que identificou no cristal presença de silício (Si), oxigênio (O_2) e carbono (C). Segundo Vasconcellos, Freitas e Silva (1995) a presença de sílica em madeiras tropicais é comum e no gênero *Protium* sp., pertencente à família Burseraceae mesma da amescla, a sílica é encontrada exclusivamente nas fibras.

A Figura 3.16 mostra a superfície do compensado em imagens feitas pelo MEV. Na superfície da amostra da testemunha são mais evidentes as fibras da madeira tornando o aspecto mais rugoso. Na amostra tratada, observou-se que os raios são mais visíveis, pois houve o achatamento das fibras que causavam o aspecto rugoso.

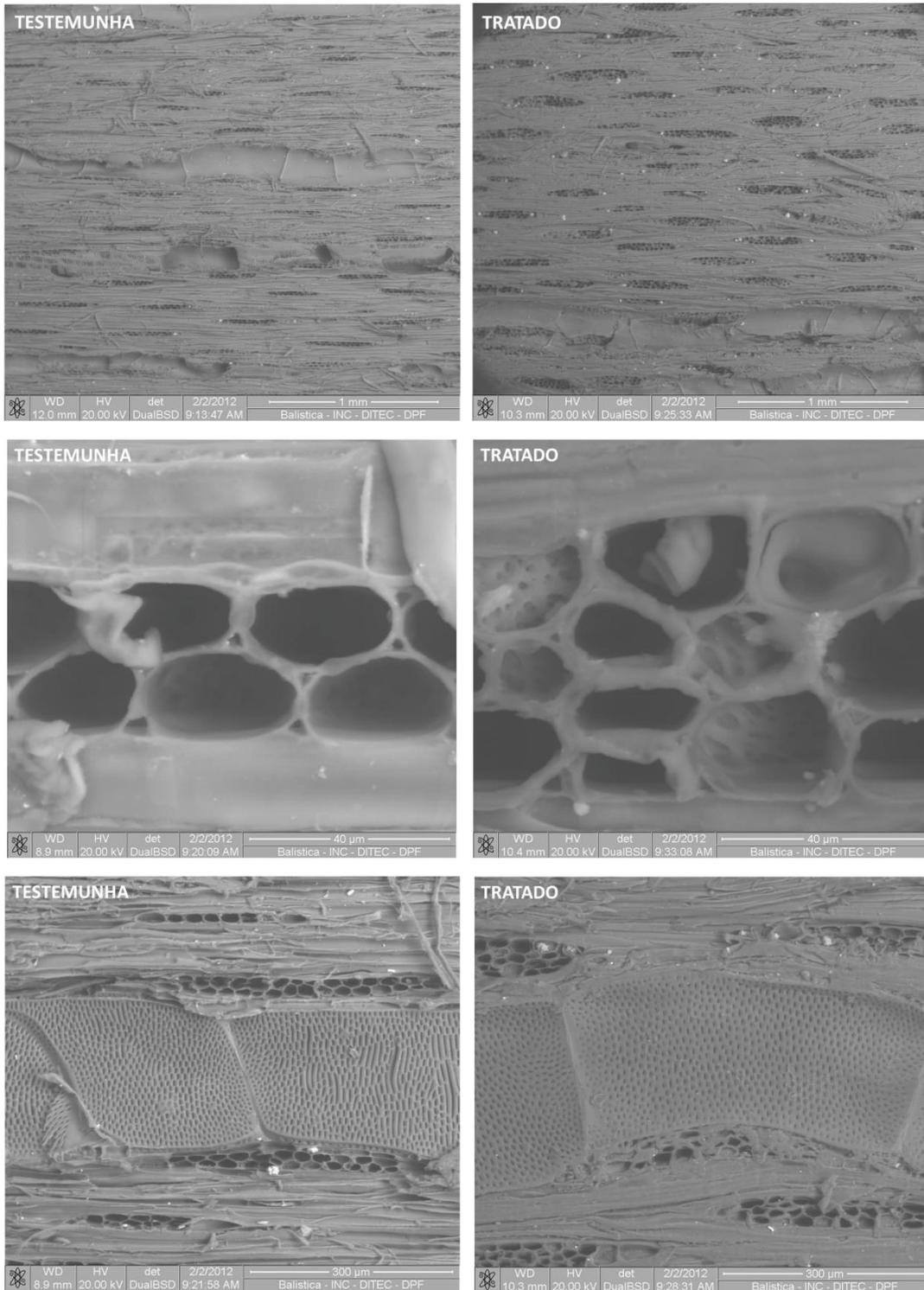


FIGURA 3.16 – Imagens da superfície das amostras realizada pelo MEV.

A segunda imagem da Figura 3.16 mostra o detalhe dos raios na superfície da amostra tratada onde se observa claramente que as bordas foram achatadas devido à compressão mecânica. A última imagem compara o tamanho das pontuações dos vasos antes e depois do tratamento. Observou-se que na madeira tratada as pontuações estão

mais fechadas porque os vasos foram comprimidos e isso foi importante para a redução da porosidade das lâminas, reduzindo a molhabilidade.

4 CONCLUSÃO

O tratamento termomecânico das lâminas tornou os compensados mais densos e com menor teor de umidade de equilíbrio. Em razão da liberação das tensões de compressão, o inchamento em espessura, a absorção de água e a taxa de não retorno em espessura foram maiores para os compensados produzidos com lâminas tratadas, o que tornou esses compensados menos estáveis dimensionalmente.

Porém, o tratamento das lâminas melhorou o módulo de elasticidade, a resistência à compressão paralela, a dureza e a resistência ao cisalhamento na linha de cola. A análise de imagens deixou claro que a densificação mudou as estruturas internas da madeira, achatando os vasos e raios, no entanto, sem causar colapso nas paredes celulares, o que foi importante para a manutenção da resistência.

Para estudos futuros recomenda-se a investigação das relações entre a densificação e a redução da quantidade de cola e do tempo de prensagem do compensado. Além disso, poderiam ser feitas análises econômicas para verificar a viabilidade desse tratamento na cadeia de produção do compensado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÅKERHOLM, M.; SALMÉN, L. Softening of Wood Polymers Induced by Moisture Studied by Dynamic FTIR Spectroscopy. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 94, p. 2032-2040, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D1037**: Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. Pennsylvania, EUA, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D2395**: Standard Test Methods for Specify Gravity for Wood and Wood-Based Materials. Pennsylvania, EUA, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D4442**: Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials. Pennsylvania, EUA, 2007.
- ARRUDA, L. M.; GONÇALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. S.; MELO, R. R. Estudo Preliminar das Propriedades de Compensados Produzidos com Lâminas de Paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) Modificadas Termomecanicamente. **Ciência da Madeira**, v. 2, n. 1, p. 29-42, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Estudo Setorial 2008: Ano Base 2007**. ABIMCI, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Programa Nacional de Qualidade da Madeira – Compensados de Madeira Tropical e Pinus**. Curitiba, 2009. 10 p.
- AYDIN, I.; COLAKOGLU, G. Effects of Surface Inactivation, High Temperature Drying and Preservative Treatment on Surface Roughness and Colour of Alder and Beech Wood. **Applied Surface Science**, v. 252, n. 2, p. 430-440, 2005.
- BEKHTA, P.; HIZIROGLU, S.; SHEPELYUK, O. Properties of Plywood Manufactured from Compressed Veneer as Building Material **Materials and Design**, v. 30, p. 947-953, 2009.
- 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.
- BHUIYAN, T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Changes of Crystallinity in Wood Cellulose by Heat Treatment Under Dried and Moist Conditions. **Journal of Wood Science**, v. 46, n. 6, p. 431-436, 2000.

- BHUIYAN, T. R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Effect of Intermittent Heat Treatment on Crystallinity in Wood Cellulose. **Journal of Wood Science**, v. 47, n. 5, p. 336-341, 2001.
- BLOMBERG, J.; PERSSON, B. Plastic Deformation in Small Clear Pieces of Scots Pine (*Pinus sylvestris*) During Densification With the CaLignum Process. **Journal of Wood Science**, v. 50, n. 4, p. 307-314, 2004.
- BOONSTRA, M. J.; TJEERDSMA, B. Chemical Analysis of Heat Treated Softwoods. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 64, n. 3, p. 204-211, 2006.
- 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.
- BUZETO, F. A.; CAMPOS, J. S. C. Modificação do Ângulo de Contato de Amostras de Borracha Natural Submetida a Tratamento por Descarga Corona. In: Congresso CONAMET/SAM 2004, La Serena. **Actas...** 2004. p.152.
- CAMARGOS, J. A.; GONÇALEZ, J. C. A Colorimetria Aplicada como Instrumento na Elaboração de uma Tabela de Cores de Madeira. **Brasil Florestal**, v. 20, n. 71, p. 30-41, 2001.
- CANDAN, Z.; HIZIROGLU, S.; MCDONALD, A. G. Surface Quality of Thermally Compressed Douglas-fir Veneer. **Materials and Design**, v. 31, n. 7, p. 3574-3577, 2010.
- CHARRIER, B.; CHARRIER, F.; JANIN, G.; KAMDEM, D. P.; IRMOULI, M.; GONÇALEZ, J. C. Study of Industrial Boiling Process on Walnut Colour: Experimental Study under Industrial Conditions. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 60, n. 4, p. 259-264, 2002.
- CLEMENT, C.; HIGUCHI, N. A Floresta Amazônica e o Futuro do Brasil. **Ciência e Cultura**, v. 58, n. 3, p. 44-49, 2006.
- CLOUTIER, A.; FANG, C.; MARIOTTI, N. Densification of Wood Veneers Under the Effect of Heat, Steam and Pressure. In: International Convention of Society of Wood Science and Technology, 51. 2008, Concepcion, Chile. **Proceedings...** Concepcion: Universidad del Bío-Bío, 2008.
- DEL MENEZZI, C. H. S. **Estabilização Dimensional Por Meio do Tratamento Térmico e Seus Efeitos Sobre as Propriedades de Painéis de Partículas Orientadas (OSB)**. 2004. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2004.
- DEL MENEZZI, C. H. S.; TOMASELLI, I. Contact Thermal Post-Treatment of Oriented Strandboard to Improve Dimensional Stability: A preliminary Study. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 64, n.3, p. 212-217, 2006.
- ESTEVES, B. M.; DOMINGOS, I. J.; PEREIRA, H. M. Pine Wood Modification by Heat Treatment in Air. **BioResources**, v. 3, n. 1, p. 142-154, 2008.

- ESTEVEES, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. **BioResources**, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009.
- ESTEVEES, B.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Melhoramento Tecnológico por Modificação Térmica de Madeiras Portuguesas. In: Congresso Florestal Nacional. 2005, Lisboa, Portugal. **Anais...** 2005. 9p.
- ESTEVEES, B.; MARQUES, A. V.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Heat-Induced Colour Changes of Pine (*Pinus pinaster*) and Eucalypt (*Eucalyptus globulus*) Wood. **Wood Science and Technology**, v. 42, n. 5, p. 369-384, 2008.
- EUROPEAN STANDARD. **BS EN 310**: Wood-based panels. Determination of Modulus of Elasticity in Bending and of Bending Strength. Brussels, 1993.
- EUROPEAN STANDARD. **BS EN 314-1**: Plywood – Bonding Quality. Part 1: Test Methods. Brussels, 2004.
- FANG, C.; CLOUTIER, A.; BLANCHET, P.; KOUBAA, A. Densification of Wood Veneers Combined with Oil-Heat Treatment. Part II: Hygroscopicity and Mechanical Properties. **BioResources**, v. 7, n. 1, p. 925-935, 2012.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508p.
- FURNESS, J. **Thermoplastics – An Introduction**. 2001. Disponível em: <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=83>>. Acesso em: 29 jun. 2011.
- 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).
- GOUVEIA, F. N. **Aplicação de Tratamentos Térmicos para Estabilização Colorimétrica de Madeiras Tropicais**. 2008. 143 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- GRZESKIEWICZ, M.; BORYSIUK, P.; JASKÓLWSKI, W. Physical and Mechanical Properties and Burning Behavior of Beech Plywood Made of Thermally Modified Veneers. In: International Panel Products Symposium. 2009, Nantes, France. **Proceedings...** 2009. p.1-36.
- GUEDES, R. J. M. **Análise do Comportamento à Fluência de Materiais Compósitos**. 1992. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Estrutural) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 1992.
- GÜNDÜZ, G.; KORKUT, S.; AYDEMIR, D.; BEKAR, I. The Density, Compression Strength and Surface Hardness of Heat Treated Hornbeam (*Carpinus betulus*) Wood. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v. 11, n. 1, p. 61-70, 2009.
- GÜNDÜZ, G.; KORKUT, S.; KORKUT, D. S. The Effects of Heat Treatment on Physical and Technological Properties and Surface Roughness of Camiyani Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 2275-2280, 2008.

- HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; ZOULALIAN, A.; GÉRARDIN, P. Investigation of Wood Wettability Changes During Heat Treatment on the Basis of Chemical Analysis. **Polymer Degradation and Stability**, v. 89, n. 1, p. 1-5, 2005.
- HEGER, F.; GROUX, M.; GIRARDET, F.; WELZBACHER, C. R.; RAPP, A. O.; NAVI, P. Mechanical and Durability Performance of THM Densified Wood In: Workshop COST Action E22 'Environmental Optimisation of Wood Protection. 2004, Lisboa, Portugal. **Proceedings...** 2004. p. 1-10.
- HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; TEIXEIRA, L.M.; LIMA, A.J.N. O mercado internacional de madeira tropical está à beira do colapso. **SBPN Scientific Journal**, v.1, n.2, p. 33-41, 2006.
- HILLIS, W. E. High Temperature and Chemical Effects on Wood Stability. **Wood Science and Technology**, v.18, p. 281-293, 1984.
- INOUE, M.; NORIMOTO, M.; TANAHASHI, M.; ROWELL, R. M. Steam or Heat Fixation of Compressed Wood. **Wood and Fiber Science**, v. 25, n. 3, p. 224-235, 1993.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Banco de Dados de Madeiras Amazônicas**. Laboratório de Produtos Florestais, Brasília-DF, 2001. Disponível em:< <http://www.ibama.gov.br/lpf/madeira/introducao.htm>>. Acesso em: 25 jun. 2011.
- INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. CAMPOS FILHO, E. M. (Org.). **Guia de Identificação**. Volume II, Coleção Plante as Árvores do Xingu e Araguaia. São Paulo: ISA, 2009. 304 p.
- INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION (ITTO). **Annual Review and Assessment of the World Situation**. International Tropical Timber Organization. Yokohama, Japan, 200p. 2010.
- IWAKIRI, S.; OLANDOSKI, D. P.; LEONHARDT, G.; BRAND, M. A. Produção de Chapas de Madeira Compensada de Cinco Espécies de Pinus Tropicais. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 2, p. 71-77, 2001.
- JANKOWSKY, I. P. Fundamentos da Secagem de Madeiras. **Documentos Florestais**, Piracicaba, SP, 1990. p.1-13.
- KAMKE, F. A.; SIZEMORE, H. **Viscoelastic thermal compression of wood**. USA Patent n. 7404422, 2005.
- KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; BOLUK, Y. Effect of Thermal Treatment on the Chemical Composition and Mechanical Properties of Birch and Aspen. **BioResources**, v. 3, n. 2, p. 517-537, 2008.
- KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; DORÉ, G.; YOUNSI, R. Effect of Heat Treatment on the Wettability of White Ash and Soft Maple by Water. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 66, p. 335-361, 2008.
- KOLLMANN, F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of Wood Science and Technology: Part II - Wood Based Materials**. New York: Springer-Verlag Berlin, 1975.

- KORKUT, D. S.; AKGÜL, M.; DÜNDAR, T. The Effects of Heat Treatment on Some Technological Properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 1861-1868, 2008.
- KORKUT, D. S.; KORKUT, S.; BEKAR, I.; BUDAKCI, M.; DILIK, T.; ÇAKICIER, N. The Effects of Heat Treatment on the Physical Properties and Surface Roughness of Turkish Hazel (*Corylus colurna* L.) Wood. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 9, p. 1772-1783, 2008.
- KRÜSS. **Software for Drope Shape Analysis - Installation and Operation**. KRÜSS GmbH, Hamburg, 2004.
- KUBOJIMA, Y.; OKANO, T.; OHTA, M. Bending Strength and Toughness of Heat-Treated Wood. **Journal of Wood Science**, v. 46, n. 1, p. 8-15, 2000.
- KULTIKOVA, E. **Structure and Properties Relationships of Densified Wood**. 1999. 133 f. 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.
- KUROWSKA, A.; BORYSIUK, P.; MAMINSKI, M.; ZBIEC, M. Veneer Densification as a Tool for Shortening of Plywood Processing 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, 2012.
- KUTNAR, A.; KAMKE, F. A.; SERNEK, M. Density Profile and Morphology of Viscoelastic Thermal Compressed Wood. **Wood Science and Technology**, v. 43, n. 1-2, p. 57-68, 2009.
- KUTNAR, A.; SERNEK, M. Densification of Wood. **Zbornik gozdarstva in lesarstva**, v. 82, p. 53-62, 2007.
- KWOK, D. Y.; NEUMANN, A. W. Contact Angle Measurement and Contact Angle Interpretation. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 81, n. 3, p. 167-249, 1999.
- LOPES, J. **Colorimetria da Madeira Termorretificada de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden**. 2010. 28 f. Monografia de Graduação (Graduação em Engenharia Florestal) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2010.
- MADGUIMARÃES. **Amesclão**. Disponível em: <<http://www.madguimaraes.com.br/amesclao.htm>>. Acesso em: 05 mar. 2012.
- MANTANIS, G. I.; YOUNG, R. A. Wettability of Wood. **Wood Science and Technology**, v. 31, p. 339-353, 1997.
- MATOSKI, S. L. S.; ROCHA, M. P. Influência do Fotoperíodo no Ataque de *Dinoderus minutus* Fabricius (Coleoptera: Bostrichidae) em Lâminas Torneadas de Espécies Tropicais. **Floresta**, v. 36, n. 3, p. 385-396, 2006.

- MILLER, E. C. **Plant Physiology**. First Ed. Mc Graw-Hill, New York, 1931, 933p.
- MITUTOYO CORPORATION. **SJ – 301 Surfrest Roughness Tester**. User's manual, 2004. 346p.
- 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.
- MOMOHARA, I. ; OHMURA, W. ; KATO, H. ;KUBOJIMA, Y. Effect of High-Temperature Treatment on Wood Durability Against the Brown-rot Fungus, *Fomitopsis palustris*, and the Termite, *Coptotermes formosanus*. In: International IUFRO Wood Drying Conference, 8., 2003, Brasov, Romania. **Proceedings...** IUFRO, 2003. p. 284-287.
- MORSING, N. **Densification of Wood The Influence of Hygrothermal Treatment on Compression of Beech Perpendicular to the Grain**. TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK, p.1-145. 2000. (N. 79)
- 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.
- NEESE, J. L.; REEB, J. E.; FUNCK, J. W. Relating Traditional Surface Roughness Measures to Glue-Bond Quality in Plywood. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 1, p. 67-73, 2004.
- PIAO, C.; WINANDY, J. E.; SHUPE, T. F. From Hidrophilicity to Hydrophobicity: A Critical Review: Part 1. Wettability and Surface Behavior. **Wood and Fiber Science**, v. 42, n. 4, p. 490-510, 2010.
- PLATOWOOD. **The Plato Technology**. Plato International BV, 2009.
- RAPP, A. O.; SAILER, M. Heat Treatment of Wood in Germany - State of the Art. In: Special Seminar of COST Action E22. 2001, Antibes, France. **Proceedings...** 2001.
- REEB, J. E. **Wood and Moisture Relationships**. Oregon (EUA): Oregon State University Extension Service, EM 8600, June 1995. 8p.
- REICHARDT, K. A água: absorção e translocação. In: FERRI, M. G. (coord.) **Fisiologia Vegetal**. 4ª Ed. São Paulo: EPU, 1985, p.03-24.
- REVISTA ELETRÔNICA DO DEPARTAMENTO DE QUÍMICA DA UFSC. A Era dos Plásticos. QMCWEB, Florianópolis, ano 4. Disponível em: <<http://www.qmc.ufsc.br/qmcweb/artigos/polimeros.html>>. Acesso em: 23 de nov. 2011.
- ROWELL, R. M.; BANKS, W. B. **Water Repellency and Dimensional Stability of Wood**. Forest Products Laboratory. Madison, WI, p.1-28. 1985. (Gen. Tech. Rep. FPL-50).

- ROWELL, R. M.; LEVAN-GREEN, S. L. Thermal Properties. In: ROWELL, R. M (Ed). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composities**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005, 487p.
- ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. Cell Wall Chemistry. In: ROWELL, R. M (Ed). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composities**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005, 487p.
- ROWELL, R. M.; YOUNGS, R. L. **Dimensional Stabilization of Wood in Use**. Forest Products Laboratory. Madison, WI, 8pp. 1981 (Gen. Tech. Rep. FPL-0243).
- SEBORG, R. M.; MILLETT, M. A.; STAMM, A. J. **Heat-Stabilized Compressed Wood (Staypak)**. Forest Products Laboratory. Madison, EUA, p.1-21. 1956. (Report nº 1580)
- SERNEK, M.; GÉRARDIN, P.; PETRISSANS, M. Impact of Heat Treatment on the Wettability of Wood. In: PTFBPI. 2010, Salzburg, Austria. **Proceedings...** p. 20.
- SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das Propriedades Higroscópicas da Madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. em Diferentes Condições de Umidade Relativa do Ar. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 2, p.233-239, 2003.
- SKAAR, C. **Wood-water relations**. Springer-Verlag: Berlim, 1988. 283p.
- STAMM, A. J.; BURR, H. K.; KLINE, A. Staybwood...Heat-Stabilized Wood. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 38, n. 6, p. 630-634, 1946.
- STAMM, A. J.; CHIDESTER. **Yearbook of Agriculture 1943-1947 Part 5**. U.S. Department of Agriculture, 1947. Disponível em: <http://science-in-farming.library4farming.org/Part_5/New-Goods-From-Wood.html>. Acesso em: 19 nov. 2010.
- STAMM, A.J. **Wood and cellulose science**. New York: Ronald Press, 1964. 549 p.
- SUCHSLAND, O.; JANKOWSKY, I. P. A. **Produção de Lâminas de Madeira por Desenrolamento**. IPEF. Piracicaba, SP, 9p. 1978 (Circular Técnica nº 33).
- SUNDQVIST, B. **Color Changes and Acid Formation in Wood During Heating**. 2004. 154 f. Thesis (Doctoral) - Division of Wood Material Science, Lulea University of Technology, Skelleftea, Sweden, 2004.
- SUNDQVIST, B.; KARLSSON, O.; WESTERMARK, U. Determination of Formic-acid and Acetic Acid Concentrations Formed During Hydrothermal Treatment of Birch Wood and its Relation to Colour, Strength and Hardness. **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 7, p. 549-561, 2006.
- THERMOWOOD. **Thermo Wood Handbook**. Finnish Thermo Wood Association, Helsinki, Finland. 2003.
- VASCONCELLOS, F. J. de; FREITAS, J. A.; SILVA, A. C. Observação Microscópica de Inclusões Minerais no Xilema de Espécies Tropicais da Amazônia. **Acta Amazonica**, v.25, n.1/2, p. 55-68, 1995.

- VERNOIS, M. Heat Treatment of Wood in France – State of the Art. In: Special Seminar of COST Action E22. 2001, Antibes, France. **Proceedings...** 2001.
- WARD, I. M. **Mechanical properties of solid polymers**, 2nd ed. Wiley-Interscience. New York, NY. 1983.
- 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, n. 3, p. 216-220, 2003.
- WELZBACHER, C. R.; RAPP, A. O.; HEGER, F.; GIRARDET, F.; NAVI, P. Decay Resistance of Thermo-Hydro-Mechanically Densified Wood. In: Workshop COST Action E22 ‘Environmental Optimisation of Wood Protection. 2004, Lisboa, Portugal. **Proceedings...** 2004. p. 1-7.
- WELZBACHER, C. R.; WEHSENER, J.; RAPP, A. O.; HALLER, P. 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, p. 39-49, 2008.
- 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.
- XIE, Y.; LIU, Y.; SUN, Y. Heat-Treated Wood and Its Development in Europe. **Journal of Forestry Research**, v. 13, n. 3, p. 224-230, 2002.
- YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. Mechanical and Chemical Behavior of Spruce Wood Modified by Heat. **Building and Environment** v. 41, p. 1762-1766, 2006.
- ZOGHBI, M. G. B.; SIQUEIRA, J. B. G.; WOLTER, E. L. A.; ORLANDO JÚNIOR, L. P. Constituintes Químicos de *Protium paniculatum* (Burseraceae). **Acta Amazonica**, v. 23, n. 2-3, p. 187-189, 1993.

ANEXOS

A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CAPÍTULO 2

TABELA A.1 – Estatística descritiva das propriedades físicas das lâminas.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Número de repetições
IE2h	Testemunha	5,08	2,94	10
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	11,72	3,33	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	14,94	4,5	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	14,40	2,98	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	14,81	3,37	10
AB2h	Testemunha	61,14	3,32	10
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	61,36	2,44	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	59,65	4,93	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	65,47	3,7	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	79,12	4,8	10
TUE	Testemunha	9,22	0,61	10
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	8,58	1,02	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	8,39	0,76	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	7,99	0,84	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	7,80	0,85	10
DA inicial	Testemunha	-	-	-
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	0,53	0,05	30
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	0,50	0,05	30
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	0,51	0,05	30
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	0,50	0,05	30
DA final	Testemunha	-	-	-
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	0,58	0,06	30
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	0,57	0,04	30
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	0,58	0,06	30
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	0,57	0,05	30
PM imediata	Testemunha	-	-	-
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	8,22	0,31	30
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	8,3	0,40	30
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	9,44	0,33	30
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	9,6	0,36	30
PM definitiva	Testemunha	-	-	-
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	1,93	0,30	30
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	2,20	0,40	30
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	2,87	0,33	30
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	2,95	0,35	30
TC imediata	Testemunha	-	-	-
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	12,70	5,22	30
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	16,69	5,43	30
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	17,88	5,87	30
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	17,27	6,14	30
TC definitiva	Testemunha	-	-	-
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	10,54	4,23	30
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	13,45	5,64	30
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	14,91	5,17	30
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	15,07	5,00	30

TABELA A.2 – Estatística descritiva dos parâmetros de rugosidade das lâminas.

Propriedade	Tratamento	Lado sem fendas		Lado com fendas		N. repetições
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
Ra antes	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	10,20	1,87	12,37	2,38	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	10,03	2,06	14,29	1,82	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	11,83	2,38	16,56	3,93	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	10,40	2,53	13,14	1,92	10
Ra depois	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	9,39	1,68	8,73	1,67	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	8,22	1,96	8,34	2,13	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	8,38	0,98	8,93	1,82	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	6,31	1,93	7,64	2,06	10
Rz antes	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	58,56	8,32	70,67	11,49	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	59,07	11,09	79,64	7,72	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	67,25	11,01	88,49	19,40	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	68,14	9,09	75,49	6,58	10
Rz depois	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	57,04	12,45	55,54	13,80	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	52,79	10,99	50,49	12,29	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	53,13	9,11	50,79	9,05	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	39,94	10,42	43,93	10,13	10
Rt antes	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	92,92	11,54	101,47	17,51	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	97,54	26,21	113,57	19,24	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	99,67	15,55	119,51	18,20	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	98,68	15,66	102,96	10,21	10
Rt depois	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	90,87	17,67	90,25	24,12	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	80,84	12,99	81,11	20,82	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	88,21	16,85	87,66	19,78	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	56,79	18,27	70,17	22,81	10

TABELA A.3 – Estatística descritiva dos parâmetros colorimétricos das lâminas.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Número de repetições
L antes	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	77,28	2,96	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	76,43	2,38	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	77,47	1,93	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	76,68	3,26	10
L depois	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	75,38	2,91	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	74,33	2,19	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	70,46	3,96	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	67,75	4,15	10
a* antes	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	8,41	1,69	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	9,17	1,38	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	8,39	1,23	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	8,88	1,65	10
a* depois	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	9,0	1,53	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	9,34	1,25	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	9,55	1,79	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	9,68	1,30	10
b* antes	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	22,32	2,03	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	22,56	1,52	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	22,68	1,54	10

	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	22,67	1,36	10
b* depois	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	22,48	1,89	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	22,63	1,65	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	22,09	0,70	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	22,48	1,42	10
C antes	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	23,89	2,29	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	24,38	1,71	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	24,21	1,50	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	24,50	1,59	10
C depois	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	24,25	2,08	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	24,51	1,68	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	24,26	1,18	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	24,51	1,54	10
h* antes	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	69,45	3,09	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	67,93	2,66	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	69,68	3,04	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	68,74	3,68	10
h* depois	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	68,23	2,97	10
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	67,56	2,82	10
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	66,90	3,77	10
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	66,74	2,73	10

TABELA A.4 – Análise de variância do teste-t pareado a 5% de significância para a densidade aparente.

Tratamento	Variável	Média	Desvio Padrão	Erro padrão	t	gl	Sig.
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	DA antes – DA depois	-0,005	0,03	0,006	-9,301	29	0,000*
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-0,07	0,04	0,008	-9,175	29	0,000*
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		-0,069	0,04	0,007	-9,243	29	0,000*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-0,077	0,04	0,0067	-11,42	29	0,000*

TABELA A.5 – Análise de variância do teste-t pareado a 5% de significância para a rugosidade e molhabilidade.

Lado sem fendas

Tratamento	Variável	Média	Desvio Padrão	Erro padrão	t	gl	Sig.
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Ra antes – Ra depois	0,81	1,58	0,53	1,533	8	0,164 ^{NS}
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		1,81	2,66	0,84	2,159	9	0,059 ^{NS}
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		3,45	2,42	0,86	4,021	7	0,005*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		4,08	2,99	0,94	4,321	9	0,002*
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Rz antes –Rz depois	1,52	10,97	3,47	0,438	9	0,672 ^{NS}
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		6,28	14,22	4,49	1,397	9	0,196 ^{NS}

180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		14,12	13,11	4,37	3,23	8	0,012*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		29,19	11,32	4,00	7,29	7	0,000*
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Rt antes – Rt depois	2,11	14,37	5,43	0,389	6	0,710 ^{NS}
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		16,67	24,58	7,77	2,148	9	0,60 ^{NS}
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		11,47	18,40	6,13	1,96	8	0,99 ^{NS}
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		41,88	20,19	6,73	6,22	8	0,000*
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	AC antes – AC depois	-22,51	24,15	8,05	-2,796	8	0,023*
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-30,64	30,45	9,63	-3,182	9	0,011*
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		-58,50	27,48	8,69	-6,73	9	0,000*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-56,00	32,67	10,89	-5,143	8	0,001*

Lado com fendas

Tratamento	Variável	Média	Desvio Padrão	Erro padrão	t	gl	Sig.
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Ra antes – Ra depois	3,64	2,29	0,76	4,782	8	0,001*
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		5,94	3,17	1,00	5,925	9	0,000*
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		7,63	4,16	1,39	5,496	8	0,001*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		5,49	2,61	0,86	6,321	8	0,000*
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Rz antes –Rz depois	15,13	15,73	4,97	3,041	9	0,014*
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		29,15	13,37	4,22	6,896	9	0,000*
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		37,70	20,96	6,98	5,397	8	0,001*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		31,56	11,85	3,05	7,990	8	0,000*
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Rt antes – Rt depois	11,22	30,39	9,61	1,168	9	0,273 ^{NS}
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		32,46	21,62	6,84	1,748	9	0,001*
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		31,85	35,74	11,30	2,818	9	0,020*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		32,78	25,03	8,34	3,929	8	0,004*
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	AC antes – AC depois	-17,49	25,81	9,76	-1,793	6	0,123 ^{NS}
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-18,50	24,53	10,02	-1,847	5	0,124 ^{NS}

180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		-34,04	22,74	10,17	-3,347	4	0,029*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-67,65	20,14	11,63	-5,818	2	0,028*

TABELA A.6 – Análise de variância do teste t-pareado a 5% de significância para os parâmetros de colorimetria.

Tratamento	Variável	Média	Desvio Padrão	Erro padrão	t	gl	Sig.
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	L* antes – L* depois	1,90	3,65	0,57	3,30	39	0,002*
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		2,06	1,99	0,32	6,45	38	0,000*
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		7,08	4,37	0,69	10,13	38	0,000*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		8,93	6,54	1,03	8,63	39	0,000*
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	a* antes – a* depois	-0,59	2,11	0,33	-1,77	39	0,085 ^{NS}
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-0,17	1,42	0,22	0,75	39	0,457 ^{NS}
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		-1,17	2,49	0,39	2,95	39	0,005*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-0,79	2,19	0,34	-2,31	39	0,027*
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	b* antes – b* depois	-0,15	2,28	0,36	-0,43	39	0,668 ^{NS}
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-0,06	1,78	0,28	-0,22	39	0,868 ^{NS}
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		0,41	1,70	0,28	1,44	35	0,159 ^{NS}
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		0,18	1,99	0,32	0,56	38	0,576 ^{NS}
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	C antes – C depois	-0,36	2,45	0,39	-0,92	39	0,364 ^{NS}
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-0,12	2,00	0,32	-0,38	39	0,701 ^{NS}
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		-0,16	1,94	0,31	-0,53	37	0,602 ^{NS}
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		-0,01	2,17	0,34	-0,03	39	0,975 ^{NS}
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	h* antes – h* depois	1,22	4,39	0,69	1,75	39	0,088 ^{NS}
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		0,37	2,54	0,40	0,93	39	0,356 ^{NS}
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²		2,78	5,34	0,84	3,29	39	0,002*
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²		2,00	5,05	0,79	2,51	39	0,016*

TABELA A.7 – Análise de variância dos parâmetros de rugosidade comparação entre os lados.

Tratamento	Variável	SQT	gl	SQM	F calculado	Sig.
Testemunha	Ra depois	67,42	1	67,42	9,098	0,007*
		133,38	18	7,41		
		200,70	19			
Testemunha	Rz depois	2228,16	1	2228,16	12,30	0,003*
		3259,57	18	181,09		
		5487,73	19			
Testemunha	Rt depois	554,03	1	554,03	2,71	0,119 ^{NS}
		3270,74	16	204,42		
		3824,78	17			
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Ra depois	1,96	1	1,97	0,696	0,416 ^{NS}
		45,20	16	2,82		
		47,17	17			
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Rz depois	11,25	1	11,25	0,065	0,801 ^{NS}
		3110,07	18	172,78		
		3121,32	19			
140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Rt depois	0,012	1	0,012	0,000	0,996 ^{NS}
		7734,88	17	454,99		
		7734,89	18			
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	Ra depois	0,076	1	0,076	0,18	0,895 ^{NS}
		75,53	18	4,196		
		75,60	19			
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	Rz depois	26,45	1	26,45	0,194	0,664 ^{NS}
		2448,36	18	136,02		
		2474,81	19			
140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	Rt depois	0,356	1	0,356	0,001	0,973 ^{NS}
		5421,17	18	301,18		
		5421,53	19			
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Ra depois	1,286	1	1,286	0,576	0,460 ^{NS}
		33,51	15	2,234		
		34,79	16			
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Rz depois	24,73	1	24,73	0,300	0,592 ^{NS}
		1320,45	16	82,53		
		1345,18	17			
180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	Rt depois	1,439	1	1,439	0,004	0,949 ^{NS}
		5794,05	17	340,83		
		5795,49	18			
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	Ra depois	6,283	1	6,283	1,572	0,226 ^{NS}
		71,927	18	3,996		
		78,210	19			
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	Rz depois	66,39	1	66,39	0,629	0,438 ^{NS}
		1900,82	18	105,60		
		1967,22	19			
180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	Rt depois	417,15	1	417,15	0,977	0,336 ^{NS}
		7689,19	18	427,18		
		8106,35	19			

TABELA A.8 – Análise de variância a 5% de significância com teste post-hoc de Dunnett para as propriedades de estabilidade dimensional.

ANOVA

Variável		SQT	gl	SQM	F	Sig.
IE 2h	Entre os grupos	686,26	4	171,56	6,60	0,000*
	Dentro dos grupos	1091,07	42	25,98		
	Total	1777,33	46			
AB 2h	Entre os grupos	684,17	4	171,04	1,96	0,119 ^{NS}
	Dentro dos grupos	3578,16	41	87,27		
	Total	4262,33	45			
TUE	Entre os grupos	12,39	4	3,1	5,06	0,002*
	Dentro dos grupos	27,53	45	0,612		
	Total	39,92	49			

Teste de Dunnett a 5% de significância.

Variável	(I) Tratamento	(J) Tratamento	Diferença média (I) – (J)	Erro padrão	Sig.
IE 2h	1	0	6,648	2,341	0,024*
	2	0	9,868	2,341	0,000*
	3	0	9,326	2,279	0,001*
	4	0	9,729	2,341	0,001*
AB 2h	1	0	0,222	4,431	1,000 ^{NS}
	2	0	-1,490	4,431	0,992 ^{NS}
	3	0	4,333	4,177	0,695 ^{NS}
	4	0	8,985	4,177	0,120 ^{NS}
TUE	1	0	-,6386	0,349	0,219 ^{NS}
	2	0	-,8290	0,3497	0,072 ^{NS}
	3	0	-1,230	0,3497	0,004*
	4	0	-1,424	0,3497	0,001*

TABELA A.9 – Análise de variância a 5% de significância para o ΔE .

	SQT	gl	SQM	F	Sig.
Entre os grupos	1083,488	3	361,16	28,85	0,000*
Dentro dos grupos	1852,44	148	12,52		
Total	2935,93	151			

TABELA A.10 – Análise fatorial a 5% de significância para as propriedades físicas e colorimétricas das lâminas.

Fator	Variável	SQT	gl	SQM	F calculado	Sig.
Temperatura	DA final	3,000E-5	1	3,000E-5	0,01	0,922 ^{NS}
	PM definitiva	20,80	1	20,80	344,15	0,000*
	TC definitiva	265,07	1	265,07	10,43	0,002*
	IE 2h	14,87	1	14,87	0,485	0,491 ^{NS}
	AB 2h	472,82	1	472,87	5,77	0,022*
	TUE	3,52	1	3,52	4,61	0,039*
	L depois	1312,92	1	1312,92	113,25	0,000*
	a* depois	7,83	1	7,83	3,54	0,062 ^{NS}
	h*	46,12	1	46,12	4,79	0,030*
ΔE	839,49	1	839,49	67,07	0,000*	
Tempo	DA final	0,002	1	0,002	0,563	0,455 ^{NS}
	PM definitiva	0,812	1	0,812	13,43	0,000*
	TC definitiva	101,09	1	101,09	3,93	0,048*
	IE 2h	30,29	1	30,29	0,987	0,328 ^{NS}
	AB 2h	19,20	1	19,20	0,235	0,631 ^{NS}
	TUE	0,37	1	0,37	0,484	0,491 ^{NS}
	L depois	140,26	1	140,26	12,09	0,001*
	a* depois	2,21	1	2,21	1,00	0,319 ^{NS}
	h* depois	6,98	1	6,98	0,727	0,395 ^{NS}
ΔE	14,34	1	14,34	1,146	0,286 ^{NS}	
Interação	DA final	0,000	1	0,000	0,038	0,845 ^{NS}
	PM definitiva	0,305	1	0,305	5,05	0,27 ^{NS}
	TC definitiva	50,43	1	50,43	1,98	0,162 ^{NS}
	IE 2h	18,29	1	18,29	0,596	0,446 ^{NS}
	AB 2h	90,03	1	90,03	1,10	0,302 ^{NS}
	TUE	3,854E-5	1	3,854E-5	0,00	0,994 ^{NS}
	L depois	27,16	1	27,16	2,34	0,128 ^{NS}
	a* depois	0,434	1	0,434	0,196	0,658 ^{NS}
	h* depois	2,53	1	2,53	0,26	0,608 ^{NS}
ΔE	208,48	1	208,48	16,66	0,000*	

TABELA A.11 – Análise fatorial a 5% de significância para a rugosidade e molhabilidade das lâminas.

Lado sem fendas

Fator	Variável	SQT	gl	SQM	F calculado	Sig.
Temperatura	Ra depois	19,59	1	19,59	6,62	0,007*
	Rz depois	731,34	1	731,34	6,21	0,018*
	Rt depois	1376,85	1	1376,85	5,04	0,031*
	AC depois	1624,10	1	1624,10	1,79	0,189 ^{NS}
Tempo	Ra depois	24,21	1	24,21	8,18	0,007*
	Rz depois	790,59	1	790,59	6,71	0,014*
	Rt depois	3573,81	1	3573,81	13,07	0,001*
	AC depois	116,98	1	116,98	0,129	0,722 ^{NS}
Interação	Ra depois	1,84	1	1,84	0,62	0,440 ^{NS}
	Rz depois	220,75	1	220,75	1,87	0,180 ^{NS}
	Rt depois	960,02	1	960,02	3,51	0,070 ^{NS}
	AC depois	184,33	1	184,33	0,203	0,655 ^{NS}

Lado com fendas

Fator	Variável	SQT	gl	SQM	F calculado	Sig.
Temperatura	Ra depois	1,204	1	1,204	0,32	0,576 ^{NS}
	Rz depois	364,43	1	364,43	2,74	0,107 ^{NS}
	Rt depois	627,66	1	627,66	1,30	0,261 ^{NS}
	AC depois	5122,21	1	5122,21	8,80	0,009*
Tempo	Ra depois	8,51	1	8,51	2,25	0,143 ^{NS}
	Rz depois	401,02	1	401,02	3,01	0,091 ^{NS}
	Rt depois	2094,24	1	2094,24	4,35	0,044*
	AC depois	1421,53	1	1421,53	2,44	0,136 ^{NS}
Interação	Ra depois	2,92	1	2,92	0,77	0,385 ^{NS}
	Rz depois	18,23	1	18,23	0,14	0,713 ^{NS}
	Rt depois	284,36	1	284,36	0,59	0,447 ^{NS}
	AC depois	1260,84	1	1260,84	2,17	0,159 ^{NS}

B – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO CAPÍTULO 3

TABELA B.1 – Estatística descritiva para as propriedades físicas dos compensados.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Número de repetições
Espessura	Testemunha	8,87	0,29	24
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	8,47	0,19	24
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	8,28	0,11	22
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	8,10	0,20	24
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	7,96	0,26	24
DA	Testemunha	0,61	0,02	24
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	0,65	0,03	24
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	0,64	0,04	22
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	0,66	0,02	24
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	0,65	0,03	24
IE 2h	Testemunha	3,56	0,76	14
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	4,82	1,14	14
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	6,31	2,07	14
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	7,21	1,33	14
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	7,14	1,19	15
AB 2h	Testemunha	17,62	1,78	14
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	16,87	2,52	14
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	20,14	2,28	13
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	19,25	2,26	15
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	21,36	1,90	14
IE 24h	Testemunha	6,02	1,06	15
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	9,66	1,59	15
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	10,03	1,44	15
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	11,90	1,54	13
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	10,87	1,77	14
AB 24h	Testemunha	52,77	1,82	14

	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	50,89	2,04	15
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	56,97	4,35	14
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	52,49	4,27	15
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	53,16	3,30	14
TNRE	Testemunha	3,50	0,95	15
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	6,50	1,23	15
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	7,52	1,53	15
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	7,97	1,13	13
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	6,80	1,08	15
TUE	Testemunha	10,46	0,35	15
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	10,75	0,39	11
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	10,55	0,26	14
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	9,84	0,26	15
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	10,06	0,39	15

TABELA B.2 – Estatística descritiva para as propriedades mecânicas dos compensados.

Propriedade	Tratamento	Média	Desvio Padrão	Número de repetições
E _m	Testemunha	8603,53	1512,20	20
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	8704,18	651,88	24
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	9300,39	886,87	24
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	9036,44	800,79	23
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	9653,77	1089,04	16
f _m	Testemunha	81,15	12,13	20
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	81,69	6,32	23
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	86,10	11,98	24
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	84,04	7,85	24
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	80,87	10,41	16
f _{c,0}	Testemunha	40,23	2,49	19
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	42,65	3,81	24
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	41,52	2,93	23
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	42,92	2,90	24
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	43,56	4,47	16
f _{gv,0}	Testemunha	3,35	1,19	18
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	3,88	0,65	24
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	4,08	0,69	23
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	4,03	0,78	23
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	4,72	1,30	16
Dureza	Testemunha	4053,99	248,49	10
	140 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	4881,87	422,77	12
	140 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	4704,06	768,69	12
	180 °C/1 min./ 2,7 N/mm ²	4869,12	481,42	12
	180 °C/2 min./ 2,7 N/mm ²	4610,09	926,84	8

TABELA B.3 – Análise de variância a 5% de significância com teste post-hoc de Dunnett para as propriedades físicas dos compensados.

ANOVA

Variável		SQT	gl	SQM	F	Sig.
Espessura	Entre os grupos	12,13	4	3,03	65,52	0,000*
	Dentro dos grupos	5,48	113	0,05		
	Total	17,61	117			
Densidade	Entre os grupos	0,04	4	0,01	13,147	0,000*
	Dentro dos grupos	0,09	115	0,001		
	Total	1,44	119			
IE 2h	Entre os grupos	142,06	4	35,5	19,09	0,000*
	Dentro dos grupos	122,81	66	1,86		
	Total	264,87	70			
AB 2h	Entre os grupos	185,75	4	46,44	9,90	0,000*
	Dentro dos grupos	304,74	65	4,69		
	Total	490,49	69			
IE 24h	Entre os grupos	285,37	4	71,34	32,02	0,000*
	Dentro dos grupos	149,28	67	2,23		
	Total	434,65	71			
TNRE	Entre os grupos	179,57	4	44,89	30,97	0,000*
	Dentro dos grupos	98,57	68	1,45		
	Total	278,14	72			
TUE	Entre os grupos	7,59	4	1,89	17,25	0,000*
	Dentro dos grupos	7,15	65	0,11		
	Total	14,74	69			

Teste de Dunnett a 5% de significância

Variável	(I) Tratamento	(J) Tratamento	Diferença média (I) – (J)	Erro padrão	Sig.
Espessura	1	0	-0,40	0,06	0,000*
	2	0	-0,59	0,06	0,000*
	3	0	-0,77	0,06	0,000*
	4	0	-0,91	0,06	0,000*
Densidade	1	0	0,05	0,008	0,000*
	2	0	0,05	0,008	0,000*
	3	0	0,05	0,008	0,000*

	4	0	0,05	0,008	0,000*
IE 2h	1	0	1,26	0,51	0,058 ^{NS}
	2	0	2,74	0,51	0,000*
	3	0	3,65	0,51	0,000*
	4	0	3,58	0,51	0,000*
AB 2h	1	0	-0,74	0,82	0,775 ^{NS}
	2	0	2,52	0,83	0,013*
	3	0	1,64	0,80	0,143 ^{NS}
	4	0	3,74	0,82	0,000*
IE 24h	1	0	3,63	0,54	0,000*
	2	0	4,00	0,54	0,000*
	3	0	5,87	0,56	0,000*
	4	0	4,84	0,55	0,000*
AB 24h	1	0	-1,88	1,24	0,363 ^{NS}
	2	0	4,19	1,26	0,005*
	3	0	-0,28	1,24	0,998 ^{NS}
	4	0	0,38	1,26	0,994 ^{NS}
TNRE	1	0	3,01	0,44	0,000*
	2	0	4,02	0,44	0,000*
	3	0	4,47	0,46	0,000*
	4	0	3,31	0,44	0,000*
TUE	1	0	0,29	0,13	0,105 ^{NS}
	2	0	0,09	0,12	0,887 ^{NS}
	3	0	-0,62	0,12	0,000*
	4	0	-0,40	0,12	0,005*

TABELA B.4 – Análise de variância a 5% de significância com teste post-hoc de Dunnett para as propriedades mecânicas dos compensados.

ANOVA

Variável		SQT	gl	SQM	F	Sig.
E _m	Entre os grupos	1,417E7	4	3541454,61	3,50	0,010*
	Dentro dos grupos	1,032E8	102	1011864,13		
	Total	1,174E8	106			
f _m	Entre os grupos	438,08	4	109,52	1,11	0,354 ^{NS}
	Dentro dos grupos	10024,15	102	98,28		
	Total	10462,23	106			
f _{c,0}	Entre os grupos	130,69	4	32,67	2,93	0,025*
	Dentro dos grupos	1127,64	101	11,16		
	Total	1258,32	105			
f _{gv,0}	Entre os grupos	16,55	4	4,14	4,92	0,001*
	Dentro dos grupos	83,18	99	0,84		
	Total	99,73	103			

Dureza	Entre os grupos	4820581, 15	4	1205145,29	3,36	0,017*
	Dentro dos grupos	1,758E7	49	358863,84		
	Total	2,240E7	53			

Teste de Dunnett a 5% de significância

Variável	(I) Tratamento	(J) Tratamento	Diferença média (I) – (J)	Erro padrão	Sig.
E _m	1	0	100,65	304,55	0,992 ^{NS}
	2	0	696,86	304,55	0,079 ^{NS}
	3	0	432,91	307,55	0,425 ^{NS}
	4	0	1050,24	337,39	0,009*
f _m	1	0	0,54	3,03	0,999 ^{NS}
	2	0	4,95	3,00	0,287 ^{NS}
	3	0	2,90	3,00	0,730 ^{NS}
	4	0	-0,28	3,32	1,000 ^{NS}
f _{c,0}	1	0	2,41	1,03	0,067 ^{NS}
	2	0	1,29	1,03	0,528 ^{NS}
	3	0	2,68	1,03	0,035*
	4	0	3,32	1,13	0,015*
f _{gv,0}	1	0	0,54	0,28	0,184 ^{NS}
	2	0	0,73	0,29	0,042*
	3	0	0,68	0,29	0,063 ^{NS}
	4	0	1,38	0,31	0,000*
Dureza	1	0	827,89	256,50	0,008*
	2	0	650,08	256,50	0,048*
	3	0	815,13	256,50	0,009*
	4	0	556,10	284,15	0,168 ^{NS}

TABELA B.5 – Análise fatorial a 5% de significância para as propriedades físicas dos compensados

Fator	Variável	SQT	gl	SQM	F calculado	Sig.
Temperatura	Espessura	2,82	1	2,81	71,96	0,000*
	DA	0,002	1	0,002	2,45	0,121 ^{NS}
	IE 2h	37,00	1	37,00	16,99	0,000*
	AB 2h	45,09	1	45,09	8,90	0,004*
	IE 24h	33,64	1	33,64	13,37	0,001*
	AB 24h	17,71	1	17,71	1,36	0,248 ^{NS}
	TNRE	2,16	1	2,16	1,10	0,299 ^{NS}
	TUE	6,68	1	6,68	63,26	0,000*
Tempo	Espessura	0,61	1	0,61	15,51	0,000*
	DA	0,001	1	0,001	1,24	0,269 ^{NS}
	IE 2h	2,13	1	2,13	3,27	0,076 ^{NS}
	AB 2h	100,79	1	100,79	19,89	0,000*

	IE 24h	1,54	1	1,54	0,61	0,438 ^{NS}
	AB 24h	164,80	1	164,80	12,68	0,001*
	TNRE	0,098	1	0,098	0,05	0,824 ^{NS}
	TUE	0,002	1	0,002	0,02	0,989 ^{NS}
Interação	Espessura	0,02	1	0,02	0,39	0,532 ^{NS}
	DA	0,00	1	0,00	0,12	0,728 ^{NS}
	IE 2h	8,69	1	8,69	3,99	0,058 ^{NS}
	AB 2h	4,69	1	4,69	0,92	0,341 ^{NS}
	IE 24h	6,96	1	6,96	2,76	0,102 ^{NS}
	AB 24h	105,73	1	105,73	8,14	0,006*
	TNRE	17,90	1	17,90	9,12	0,004*
	TUE	0,60	1	0,60	5,67	0,021*

TABELA B.6 – Análise fatorial a 5% de significância para as propriedades mecânicas dos compensados.

Fator	Variável	SQT	gl	SQM	F calculado	Sig.
Temperatura	E_m	2483216,18	1	2483216,18	3,45	0,067 ^{NS}
	f_m	43,90	1	43,90	0,50	0,480 ^{NS}
	$f_{c,0}$	28,05	1	28,05	2,29	0,134 ^{NS}
	$f_{gv,0}$	3,27	1	3,27	4,56	0,036*
	Dureza	30379,15	1	30379,15	0,07	0,791 ^{NS}
Tempo	E_m	7779230,83	1	7779230,83	10,80	0,001*
	f_m	8,00	1	8,00	0,09	0,762 ^{NS}
	$f_{c,0}$	1,25	1	1,25	0,102	0,750 ^{NS}
	$f_{gv,0}$	4,11	1	4,11	5,72	0,019*
	Dureza	508883,65	1	508883,65	1,19	0,281 ^{NS}
Interação	E_m	2354,62	1	2354,62	0,003	0,955 ^{NS}
	f_m	304,33	1	304,33	3,49	0,065 ^{NS}
	$f_{c,0}$	16,46	1	16,46	1,34	0,250 ^{NS}
	$f_{gv,0}$	1,30	1	1,30	1,81	0,182 ^{NS}
	Dureza	17591,53	1	17591,53	0,04	0,840 ^{NS}