



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

MARIANA NEVES FERREIRA RIBEIRO

**EFEITO DA TEMPERATURA E PRESSÃO EM TRATAMENTO
TERMOMECÂNICO SOBRE AS PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE FIBRA DE
MÉDIA DENSIDADE (MDF)**

Brasília
2017



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

MARIANA NEVES FERREIRA RIBEIRO

**EFEITO DA TEMPERATURA E PRESSÃO EM TRATAMENTO
TERMOMECÂNICO SOBRE AS PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE FIBRA DE
MÉDIA DENSIDADE (MDF)**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof.º Dr.º Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Brasília

2017



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

**EFEITO DA TEMPERATURA E PRESSÃO EM TRATAMENTO
TERMOMECÂNICO SOBRE AS PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE FIBRA DE
MÉDIA DENSIDADE (MDF)**

Estudante: Mariana Neves Ferreira Ribeiro

Matrícula: 09/0138961

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

Menção: SS

Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi
Universidade de Brasília – UnB
Orientador

Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa
Universidade de Brasília – UnB
Membro da Banca

Prof. Dr. Joaquim Carlos Gonzalez
Universidade de Brasília – UnB
Membro da Banca

Brasília – DF, Junho de 2017

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Joel Ribeiro e Marleide Neves por todo apoio e carinho.

Ao Arthur Campos por estar sempre disposto a me ajudar.

À Priscila Santos e Larissa Mesquita por toda colaboração na realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi pela oportunidade, paciência e orientação.

Aos funcionários do Laboratório de Produtos Florestais (LPF) e do Departamento de Engenharia Florestal.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades físicas e mecânicas de MDF (painéis de fibras de média densidade) tratado termomecanicamente. Para tanto o MDF foi submetido a quatro tratamentos, sendo estes a combinação de duas temperaturas (150°C e 170°C) e duas pressões (25% e 50% de $f_{c,90^\circ}$). Os tratamentos foram denominados: T1_(150;25), T2_(150;50), T3_(170;25) e T4_(170;50). Após os tratamentos, foram caracterizadas as propriedades de módulo de elasticidade e módulo de ruptura à flexão estática, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão paralela ao plano do painel, dureza superficial, inchamento e absorção após 2, 24 e 72 horas de imersão em água. As médias obtidas nos ensaios foram analisadas por meio do teste de Dunnett, Tukey e teste T-pareado, considerando um nível de significância menor ou igual a 5%. De forma geral, os resultados não apontaram melhorias nas propriedades físicas, já as propriedades mecânicas foram positivamente afetadas pelos tratamentos. A resistência à compressão paralela foi a única propriedade mecânica que não diferiu estatisticamente das testemunhas, isto para o tratamento T3_(170;25). Todas as outras propriedades mecânicas apresentaram valores maiores, chegando a quadruplicar o valor, no caso do ensaio de dureza superficial para o tratamento T4_(170;50). Em relação as propriedades físicas, não ocorreram melhorias em relação às testemunhas para inchamento em espessura, embora todos os tratamentos tenham apresentado menor absorção de água. De forma geral, pode-se inferir que a temperatura foi o fator mais importante para as propriedades físicas e a pressão para as propriedades mecânicas.

Palavras-chave: tratamento termomecânico, densificação, MDF, propriedades físicas, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the physical and mechanical properties of thermally compressed MDF (*medium density fiberboard*). For this purpose, the MDF was subjected to four different treatments, these being a combination of two temperatures (150 ° C and 170 ° C) and two pressures (25% and 50% fc, 90 °). The treatments were denominated: T1 (150; 25), T2 (150; 50), T3 (170; 25) and T4 (170; 50). At the end of the treatments, the following properties were characterized: elastic modulus and modulus of rupture in static bending, dynamic modulus of elasticity, compressive strength parallel to surface, surface hardness, swelling and absorption after 2, 24 and 72 hours of immersion in water. The average quantities obtained in the tests were analyzed by the Dunnett, Tukey and paired-t test, considering a level of significance equal or less than 5%. In general, the obtained results did not show any signs of improvements regarding physical properties. However, mechanical properties were positively affected by treatments. The only exception was T3 (170;25) for the parallel compressive strength, all other treatments have shown a statistically significant increase. All other mechanical properties presented higher values, reaching a fourfold value in the case of the surface hardness test for T4 treatment (170; 50). Regarding physical properties, there were no improvements compared to controls for the swelling thickness, despite all treatments have showed lower water absorption. In general, it can be inferred that temperature is the most important factor for the physical properties and a pressure is the most important factor for the mechanical properties.

Keywords: MDF, physical properties, mechanical properties, thermally compressed wood, densification.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE EQUAÇÕES	ii
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE SIGLAS	iv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1 OBJETIVO GERAL	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
3. HIPÓTESE.....	2
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4.1 PAINÉIS DE MÉDIA DENSIDADE (MDF).....	2
4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	3
4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS	5
4.4 TRATAMENTO TÉRMICO	6
4.5 TRATAMENTO TERMOMECÂNICO	8
4.6 TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOMECÂNICOS EM MDF.....	9
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
5.1 DESCRIÇÃO GERAL	10
5.2 TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS.....	12
5.3 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	15
5.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS	17
5.4.1. Ensaio de ondas de tensão.....	17
5.4.2. Ensaio destrutivos.....	18
5.5 ANÁLISE DO EXPERIMENTO	19
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
6.1 TRATAMENTO TERMOMECÂNICO	20
6.2 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	25
6.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS	30

6.3.1	Ensaio de ondas de tensão	30
6.3.2	Ensaio destrutivos	31
7	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
	APÊNDICE 1 – TRATAMENTO TERMOMECÂNICO: TAXA DE DENSIFICAÇÃO, TAXA DE COMPACTAÇÃO E PERDA DE MASSA	38
	APÊNDICE 2 – PROPRIEDADES FÍSICAS	40
	APÊNDICE 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais eixos da madeira em relação a grã e os anéis de crescimento (fonte: Forest Products Laboratory, 2010).	4
Figura 2. Prensa hidráulica usada nos tratamentos termomecânicos.	13
Figura 3. Comportamento da pressão e temperatura ao longo dos tratamentos.....	14
Figura 4. Ensaio mecânico: a) Flexão estática, b) Dureza Janka, c) Compressão paralela ao plano do painel.	19
Figura 5. Variação da temperatura no interior das amostras ao longo dos quatro tratamentos.	21
Figura 6. Amostras dos quatro tratamentos e da testemunha: a) representa T4 _(170;50) , b) T3 _(170;25) , c) T2 _(150;50) , d) T1 _(150;25) e por fim, e) representa a testemunha.	21
Figura 7. Valores médios para a) taxas de densificação, b) compactação e c) perda de massa. Teste de média por meio de Tukey com nível de significância de 5%, em que letras diferentes representam valores estatisticamente distintos.....	23
Figura 8. Taxa de inchamento em espessura ao longo de 72h.	24
Figura 9. Taxa de absorção de água ao longo de 72h.....	24
Figura 10. Comparação entre as médias de densidade.....	25
Figura 11. Interação entre temperatura e pressão para inchamento em espessura, a) em 2h; b) em 24h e c) em 72h de imersão.	28
Figura 12. Interação entre temperatura e pressão para absorção de água: a) em 24h e b) em 72h de imersão.	29
Figura 13. Interação entre pressão e temperatura para a) Teor de umidade de equilíbrio e b) Taxa de não retorno em espessura.	29

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Tensão	12
Equação 2: Pressões usadas no trabalho	12
Equação 3: Pressão ajustada no manômetro	12
Equação 4: Perda de massa	14
Equação 5: Taxa de compactação	14
Equação 6: Taxa de densificação	14
Equação 7: Inchamento em espessura.....	15
Equação 8: Absorção de água	15
Equação 9: Taxa de inchamento em espessura	15
Equação 10: Taxa de absorção	15
Equação 11: Taxa de não retorno em espessura	16
Equação 12: Teor de umidade de equilíbrio.....	16
Equação 13: Velocidade da onda de tensão	17
Equação 14: Módulo de elasticidade dinâmico	17
Equação 15: Resistência a compressão paralela ao plano do painel.....	18
Equação 16: Módulo de ruptura.....	19
Equação 17: Módulo de elasticidade	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Temperatura e pressão utilizadas em cada um dos tratamentos e testemunhas.	13
Tabela 2. Valores médios para taxa de densificação, taxa de compactação e perda de massa considerando a influência da pressão e temperatura.	23
Tabela 3. Valores médios das propriedades físicas.	26
Tabela 4. Valores médios das propriedades físicas considerando a influência da pressão e temperatura.	27
Tabela 5. Valores médios antes e depois dos tratamentos para densidade, velocidade, módulo de elasticidade.	30
Tabela 6. Valores médios das propriedades mecânicas.	31
Tabela 7. Valores médios das propriedades mecânicas considerando a influência da pressão e temperatura.	32

LISTA DE SIGLAS

ABS – absorção de água

CP - corpo-de-prova

ρ – densidade

E_d - módulo de elasticidade dinâmico

E_M - módulo de elasticidade em flexão estática

$f_{c,0^\circ}$ - resistência à compressão paralela ao plano do painel

$f_{c,90^\circ}$ - resistência à compressão perpendicular ao plano do painel

f_H – força máxima obtida no ensaio de dureza superficial

f_m - módulo de ruptura em flexão estática

IE - inchamento em espessura

MDF - *medium density fiberboard*

PM – perda de massa

P_m - pressão no manômetro da prensa

$TNRE$ - taxa de não retorno em espessura

TUE - teor de umidade de equilíbrio

TxA – taxa de absorção

TxC - taxa de compactação

TxD – taxa de densificação

TxI – taxa de inchamento em espessura

$T0_{(0;0)}$ - testemunhas

$T1_{(150;25)}$ – tratamento 1, temperatura de 150°C e pressão de 25% de $f_{c,90^\circ}$

$T2_{(150;50)}$ - tratamento 2, temperatura de 150°C e pressão de 50% de $f_{c,90^\circ}$

$T3_{(170;25)}$ - tratamento 3, temperatura de 170°C e pressão de 25% de $f_{c,90^\circ}$

$T4_{(170;50)}$ - tratamento 4, temperatura de 170°C e pressão de 50% de $f_{c,90^\circ}$

1. INTRODUÇÃO

O uso de madeira por humanos vem sendo relato desde o início dos tempos, isto porque este é um material de relativa abundância, fácil de ser trabalhado, além de apresentar boa proporção entre resistência e peso. Inicialmente, ramos e materiais fibrosos eram usados na construção de abrigo e ferramentas, além de seu uso para a obtenção de fogo. Com o passar do tempo o uso desse material foi se aperfeiçoando e atualmente pode ser utilizado em construções de grande porte, fabricação de móveis, produção de papel e celulose, produção de ferro gusa etc.

Nos tempos mais recentes vem sendo desenvolvidas novas tecnologias relacionadas ao uso de madeira, entre essas tecnologias têm-se os painéis de madeira. Este material tem elevada disponibilidade, capacidade de armazenar carbono em sua estrutura, ótima resistência em relação à sua densidade e caráter reciclável. Em relação a madeira sólida, a fabricação de painéis de madeira pode proporcionar um material isento de defeitos intrínsecos à anatomia da madeira, tais como nós, desvios de grã e tensões de crescimento. Quando comparados com materiais não renováveis como aço, plásticos, alvenaria e alumínio, os painéis de madeira apresentam um menor custo de energia para a extração de sua matéria-prima, além de menor custo de energia para sua produção e transporte.

O MDF (*medium density fiberboard*), além de apresentar as vantagens dos painéis derivados de materiais lignocelulósicos em relação a madeira maciça, apresenta características peculiares com a homogeneidade, caráter isotrópico, superfície plana e lisa e fácil usinabilidade. Pode ser utilizado, entre outros, para a construção de móveis, decorações e molduras de portas, sendo também um bom atenuante térmico e acústico (LUNGULEASA; SPÎRCHEZ, 2015).

Em ambientes internos, o MDF é relativamente estável dimensionalmente. Contudo, quando em presença de água e umidade, esse material tende a inchar. Para reduzir a característica higroscópica desse material, podem ser realizados tratamentos termomecânicos.

Tratamentos termomecânicos aliam altas temperaturas e pressão, proporcionando a degradação térmica de componentes hidrofílicos e aumentando a densidade do material. O ganho em densidade pode proporcionar ganho de propriedades mecânicas, e a degradação térmica é responsável pela redução da higroscopicidade da madeira e de seus derivados (DEL MENEZZI, 2004).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos de tratamentos termomecânicos (densificação) em propriedades físicas e mecânicas de painéis de fibra de média densidade (MDF) pós-produção.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o efeito da pressão e da temperatura em propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF sob quatro tratamentos termomecânicos distintos, sendo estes a combinação de duas temperaturas (150 e 170°C) e duas pressões (25 e 50% da pressão máxima obtida no ensaio preliminar de compressão perpendicular).

3. HIPÓTESE

Tratamentos termomecânicos alteram de forma significativa propriedades físicas (inchamento em espessura, absorção de água, taxa de não retorno em espessura, teor de umidade e densidade) e mecânicas de painéis (módulo de ruptura, módulo de elasticidade, dureza superficial e compressão paralela) de painéis de MDF.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 PAINÉIS DE MÉDIA DENSIDADE (MDF)

O MDF é fabricado a seco por meio da junção de fibras de madeira, dispostas de forma aleatória, e resinas sintéticas por meio da ação conjunta de temperatura e pressão. É um material de média densidade, esta variando de 0,50 até 0,80 g/cm³ (ASTM-D1554, 1974). Segundo Mattos *et al.* (2008) o MDF surgiu para suprir a demanda gerada pela redução de madeira maciça disponível.

Pode ser considerado um material de baixo impacto ambiental por permitir o

aproveitamento integral da árvore, por ser reciclável, pela renovação da matéria-prima, imobilização de carbono e menor demanda de energia para a produção quando comparado com o aço, plástico e alumínio (ELEOTÉRIO *et al.*, 2000). Além de apresentar isotropia, estabilidade dimensional, homogeneidade, alta usinabilidade, superfície plana e lisa, permitindo excelente aplicação de acabamentos (CAMPOS; LAHR, 2002).

O uso desse material vem aumentando devido a sua boa resistência em relação a massa específica, alta disponibilidade de matéria prima, eliminação de defeitos inerentes à madeira como nós, medula, desvio de grã e tensões de crescimento (CAMPOS; LAHR, 2002).

Segundo a ABNT NBR 15316-2 (2006), o MDF é utilizado para a fabricação de portas retas e usinadas, almofadas de portas, revestimento de parede, balaústre de escadas, pisos, rodapés, batentes e é usado também na fabricação de móveis.

Painéis de MDF (medium density fiberboard) foram introduzidos no mercado americano em meados dos anos 60 e ganharam espaço no mercado mundial devido a sua boa performance mecânica. Contudo, para a ampliação de seus usos, faz-se necessário um ganho de estabilidade dimensional (GARCIA, 2005). No Brasil, esse material só passou a ser produzido em 1997 (MATTOS *et al.*, 2008). Em escala industrial, os adesivos utilizados na fabricação de MDF são: ureia-formaldeído (UF), fenol-formaldeído (FF) e melanina-formaldeído (MF) (GARCIA, 2005).

Segundo Lessmann (2008) a resina UF é a mais frequentemente usada na fabricação de aglomerado (MDP) e MDF devido ao seu baixo custo, rápida cura, resistência a chama devido ao nitrogênio de sua composição e cor discreta.

4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

Algumas propriedades físicas da madeira são: densidade, porosidade, teor de umidade de equilíbrio e instabilidade dimensional (*i.e.* retração e inchamento), rugosidade e molhabilidade. Todas essas propriedades variam de acordo com particularidades da madeira como anisotropia, heterogeneidade e característica hidrofílica.

A madeira é um material anisotrópico, ou seja, as suas propriedades variam em função dos eixos longitudinal, tangencial e radial. O eixo longitudinal é paralelo às fibras, o radial é

perpendicular em relação aos anéis de crescimento e o tangencial é perpendicular às fibras e tangente aos anéis de crescimento (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

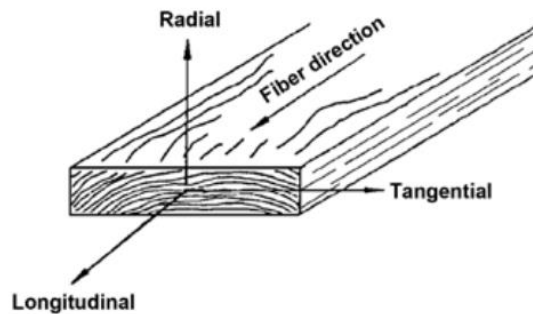


Figura 1. Principais eixos da madeira em relação a grã e os anéis de crescimento (fonte: Forest Products Laboratory, 2010).

Além de ser um material anisotrópico, a madeira também é heterogênea. Essas variações podem ser atribuídas ao local de crescimento da árvore, defeitos da madeira, posição da amostra no tronco (*i.e.* altura, distância da medula, posição do anel de crescimento) etc. (BURGER; RICHTER, 1991).

A higroscopicidade da madeira refere-se à capacidade de contrair e inchar devido à perda ou absorção de umidade, fenômeno conhecido como instabilidade dimensional. Isso ocorre principalmente devido as hemiceluloses, que são os polímeros mais higroscópicos da parede celular, e devido a região amorfa da celulose. Na região cristalina da celulose os grupos OH das moléculas de celulose estão ligados entre si, não havendo sítios para adsorção de água. Na região amorfa, por sua vez, os grupos OH se encontram disponíveis para adsorção de água (DEL MENEZZI, 2004).

A entrada de água entre as moléculas da parede celular induz um espaçamento entre as mesmas, tendo como consequência o inchamento. A perda de moléculas de água provoca uma aproximação entre as moléculas da parede celular, ou seja, retração (BURGER e RICHTER, 1991).

A variação no teor de umidade do ambiente pode alterar de forma significativa as dimensões, massa, densidade, propriedades mecânicas, elétricas e térmicas (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). O aumento do teor de umidade reduz, por exemplo, a resistência mecânica, dessa forma é essencial que seja estabelecido um equilíbrio para essa propriedade.

O MDF por sua vez é um material muito mais homogêneo que a madeira e é isotrópico. Outra característica do MDF é a maior densidade nas faces. Isso porque as faces são as regiões de maior densificação durante o processo de fabricação, resultando em uma menor quantidade de espaços vazios e menor rugosidade, que por sua vez garantem uma superfície de fácil usinagem e pintura eficiente (ELEOTÉRIO *et al.*, 2000).

A NBR ABNT 15316-2 (2006) apresenta os requisitos mínimos de propriedades físicas e mecânicas para painéis de MDF com espessura entre 12 e 19mm. Segundo essa norma o inchamento máximo após 24h é de 12%, esse requisito também é apresentado na EN 622-5(2006). Essas mesmas normas também limitam o teor de umidade entre 4 e 11% e a densidade média podendo variar em $\pm 7\%$.

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Propriedades mecânicas são relativas à aptidão do material em resistir à forças externas. Neste caso, forças externas são caracterizadas como qualquer força que tenda a deformar o material analisado. Essas propriedades são importantes para o uso em diversas aplicações, tais como: estruturas, móveis e ferramentas (RECORD, 1914).

Segundo Winandy (1994), as propriedades mecânicas incluem propriedades relativas à elasticidade e à força, que caracterizam respectivamente resistência à deformação e resistência às forças de carga.

Os fatores que influenciam as propriedades mecânicas da madeira podem ser divididos em dois grupos de fatores: internos e externos. Os fatores internos estão relacionados a organização, estes são: estrutura celular, massa específica e defeitos naturais. Já os fatores externos estão relacionados às condições de uso, tais como: temperatura, biodeterioração, tratamento e tempo de carga (WINANDY, 1994).

De forma geral, essas propriedades refletem a resistência e elasticidade do material. No presente trabalho foram aferidas as propriedades de módulo de elasticidade (E_M), módulo de ruptura (f_m), resistência a compressão paralela e dureza superficial.

O módulo de ruptura é a tensão máxima suportada pelo material em flexão estática, já o módulo de elasticidade está relacionado com a rigidez. Essas duas propriedades são obtidas por meio do ensaio de resistência à flexão estática, o qual determina a máxima tensão que pode

atuar em um corpo de prova, quando este se encontra sobre apoios na extremidade e sob a ação de uma força perpendicular ao seu eixo longitudinal.

Segundo Poncsák *et al.* (2006), a degradação de celuloses e hemiceluloses, devido ao aumento de temperatura, provoca uma redução em f_m , entretanto, neste estudo não foram relatadas alterações referentes a E_M .

A dureza Janka superficial é caracterizada pela resistência à penetração de uma semiesfera de metal com área de 1 cm². Essa propriedade é importante para a análise de trabalhabilidade do material, uma vez que afere a facilidade deste em ser raspado e riscado por outros materiais.

As normas NBR ABNT 15316-2 (2006) e EN 622-5(2006) apresentam os requisitos mínimos de propriedades físicas e mecânicas para painéis de MDF com espessura entre 12 e 19mm. Segundo essas normas mínimos são de 0,55N/mm² para ligação interna, 20N/mm² para a resistência à flexão estática e 2.200N/mm² para o módulo de elasticidade.

4.4 TRATAMENTO TÉRMICO

Apesar das vantagens do uso de madeira e seus derivados, esse tipo de material apresenta desvantagens como instabilidade dimensional, inflamabilidade, degradação frente à radiação UV, suscetibilidade à organismos xilófagos etc. Com o intuito de reduzir essas desvantagens, diversas técnicas vêm sendo desenvolvidas para a modificação das propriedades da madeira (ARAÚJO, 2010).

Contudo, esse controle depende da origem da mesma. Os principais métodos de controle são: laminação cruzada, revestimento, redução da higroscopicidade por meio de calor, alteração química e preenchimento. Laminação e revestimento são referentes a fabricação do produto, já os outros métodos, estão ligados a alterações na composição da madeira (DEL MENEZZI, 2004).

De todos os tratamentos usados para a modificação de madeiras, os tratamentos térmicos são os mais utilizados comercialmente. Estes têm como principal finalidade o controle da instabilidade dimensional (GARCIA *et al.*, 2006) e têm sido frequentes para melhora desta propriedade da madeira e seus derivados de forma tão efetiva que levou ao desenvolvimento de processos comerciais como o *Lignostone*, *Lignifol*, *Staypak*, *Staybwood*, *Thermowood*, *Plato*, *Perdure* e *Retification* (HILL, 2006).

Existem muitas possibilidades de variação para os tratamentos térmicos: uso de autoclave, estufa, prensa, o meio de tratamento pode ser ar, fumaça, vapor etc (DEL MENEZZI, 2004). Comum a todos eles são estão as elevadas temperaturas. Segundo Hill (2006), a faixa de temperatura está entre 180°C e 260°C, temperaturas inferiores a 140°C não apresentam ganhos muito expressivos e temperaturas acima de 300°C não são utilizadas devido a termodegradação do material. Estudos realizados por Yildiz *et al.* (2006), mostram que a temperatura de 150°C já é capaz de causar alterações permanentes nas propriedades físicas e químicas da madeira.

Tratamentos térmicos são tecnologias que podem aumentar a oferta de madeira e derivados com maior resistência à ataques biológicos (MOURA; BRITO, 2011), maior estabilidade dimensional, redução da condutividade térmica e menor teor de umidade de equilíbrio (GARCIA *et al.*, 2006). Dessa forma, amplia-se a gama de usos para espécies de rápido crescimento, diminuindo a demanda por madeiras de crescimento mais lento e elevado custo de obtenção. Todas essas vantagens são obtidas sem o uso de produtos químicos, sendo este outro aspecto ambiental importante (MOURA; BRITO, 2011).

As mudanças induzidas por alterações químicas oriundas dos tratamentos térmicos podem ser: melhora da estabilidade dimensional, redução da higroscopicidade, melhora na resistência contra ataque biológico, redução de propriedade mecânicas e escurecimento do material (HILL, 2006).

A redução da higroscopicidade em tratamentos térmicos é causada pela degradação de constituintes hidrofílicos da madeira, principalmente pela degradação de hemiceluloses. Em decorrência disso, a madeira se torna mais estável dimensionalmente (BORGES; QUIRINO, 2004). Outros fatores como: aumento de celulose cristalina, migração de extrativos para a superfície do material, bem como o amolecimento térmico da lignina também são importantes para o aumento da estabilidade dimensional (ROWELL *et al.*, 2002). Segundo Kamdem *et al.* (2002), esse tipo de tratamento acarreta em um aumento da proporção de lignina, tendo em vista que componentes como hemiceluloses foram degradados.

O resultado do tratamento depende principalmente: do tempo, temperatura, atmosfera usada, espécie de madeira, dimensões do material e o uso de catalisadores (HILL, 2006).

Muito embora estudos sobre tratamentos térmicos venham relatando melhoras em propriedades como estabilidade dimensional, aumento da resistência ao ataque de xilófagos e diminuição da higroscopicidade, as propriedades mecânicas nem sempre apresentam melhoras

(ARAÚJO, 2010; GEIBLER, 1983; LEHMANN, 1964; PONCSAK *et al.*, 2006; LUNGULESA & SPÎRCHEZ, 2015; STAMM, 1964).

No caso de materiais derivados de madeira, os tratamentos térmicos têm sido efetuados tanto nas partículas ou fibras antes da fabricação do painel (GARCIA *et al.*, 2006; TOMEK, 1966; ROWELL *et al.*, 2002), bem como nos painéis após a sua fabricação (DEL MENEZZI *et al.*, 2007; HSU *et al.*, 1988).

4.5 TRATAMENTO TERMOMECÂNICO

Tratamentos termomecânicos consistem no uso simultâneos de altas pressões e altas temperaturas. O ganho em relação aos tratamentos térmicos é referente às propriedades mecânicas, tendo em vista que o aumento de densidade devido à tratamentos termomecânicos culmina em um aumento de propriedades mecânicas (MORSING, 2000).

Os principais estágios da densificação são: plastização/amolecimento da parede celular, compressão da madeira nesse estado, definição da deformação por refriamento ou secagem e fixação do estado deformado ou o fenômeno de *springback* (MORSING, 2000).

Madeira sólida e seus derivados já vem sendo densificados desde os anos 30 na Alemanha, devido a necessidade de novos materiais resistentes durante a Segunda Guerra Mundial. Nessa época, a madeira sólida era tratada termomecânicamente em um processo chamado *Lignostone*, e laminados em um processo chamado *Lignofol* (KOLLMANN *et al.*, 1975).

Muito embora o aumento da densidade por tratamentos térmicos venha apresentando aumentos em propriedades mecânicas (MORSING, 2000), a compressão resulta no aumento das pressões internas na madeira, que força a espessura a voltar ao seu tamanho original, esse fenômeno é conhecido como *springback* (DEL MENEZZI, 2004; MORSING, 2000; SEBORG *et al.*, 1962). Esse fenômeno ocorre principalmente quando o material entra em contato com umidade (DEL MENEZZI, 2004). Dessa forma, torna-se necessário o controle dessas tensões internas e a redução da característica hidrofílica da madeira. Neste sentido, o presente trabalho fez uso de tratamentos termomecânicos e pós-tratamentos.

O aquecimento do material, em temperaturas que não causem carbonização, após os tratamentos já se mostrou uma solução eficiente para a redução da liberação dessas tensões.

Além de ser um método simples e barato de manter a madeira com a maior estabilidade dimensional possível (OKINO *et al.*, 2007)

4.6 TRATAMENTOS TÉRMICOS E TERMOMECÂNICOS EM MDF

Muito embora painéis MDF apresentem uma estabilidade dimensional adequada em seus usos mais correntes, a mesma não é suficiente para uso em ambientes como cozinha e banheiro (GARCIA *et al.*, 2006). Assim sendo, buscando melhorar essa característica do material alguns estudos foram realizados.

Garcia *et al.* (2006) fabricaram painéis de MDF com fibras tratadas termicamente. Os tratamentos usados foram a combinação de duas temperaturas (150 e 180°C), três tempos (15, 30 e 60 min.) e o adesivo usado foi ureia-formaldeído (UF). Neste estudo, o tratamento com 150 ou 180°C durante 15 min reduziu a absorção em espessura para as 24 horas em cerca de 27% em relação ao controle, já para as condições de 180°C durante 30 ou 60 min esse resultado foi de 46%. Já para o inchamento em espessura (IE), todos os tratamentos excederam o máximo estipulado pela norma ANSI A208.2 (2002). Segundo os autores, isso pode ser explicado pelo efeito de borda causado pelo tamanho reduzido dos corpos de prova. Para as propriedades mecânicas avaliadas não foram descritas nenhuma diferença estatisticamente significativa em relação às testemunhas.

Lungulesa e Spîrchez (2015) estudaram o efeito de tratamentos térmicos em MDF nas temperaturas de 180 e 200°C durante 3 e 5 horas. Para tanto foram usados painéis com resina UF. Muito embora esse estudo mostre uma redução na higroscopicidade e um aumento na estabilidade dimensional, as propriedades mecânicas apresentaram redução. Segundo os autores, essa redução é explicada pela alteração das coesões internas causadas pelos tratamentos, que diminuem as ligações entre adesivo e fibras.

Wandscheer *et al.* (2016) também estudaram os efeitos de tratamentos térmicos em MDF. Foram testados os tratamentos nas temperaturas 160 e 180°C, durante 6 e 12 min. Nesse estudo, os resultados das propriedades físicas (absorção de água em 2h e 24h, inchamento em espessura) não indicaram aumento na estabilidade dimensional e as propriedades mecânicas (módulo de ruptura e elasticidade em flexão estática e extração de pregos) não foram afetadas. Como recomendação dos autores tem-se a combinação de diferentes temperaturas e durações.

Ayrilmis e Winandy (2009) estudaram o efeito de tratamentos termomecânicos após a fabricação de MDF com a resina fenol-formaldeído (FF). O MDF com FF foi escolhido por essa ser uma resina mais resistente ao calor e a condições de umidade. Os tratamentos consistiram em 175°C por 15 min, 200°C por 30 min e 225°C por 30 min. Para a análise foram avaliados a rugosidade, ângulo de contato de gotas de água e ligação entre adesivo e MDF. Segundo os autores, o aumento da severidade do tratamento gera superfícies menos rugosas, tratamentos térmicos induzem modificações químicas que inativam a superfície dos painéis e a ligação proporcionada pelo adesivo é reduzida com o aumento do ângulo de contato de gotas de água.

Ayrilmis *et al.* (2009) estudaram os efeitos em propriedades físicas – densidade, inchamento em espessura e absorção de água - de MDF tratados sob as mesmas condições do trabalho proposto por Ayrilmis e Winandy (2009). A densidade não apresentou diferença significativa em relação a testemunha para nenhum dos tratamentos. Para inchamento em espessura (IE), o menor valor foi obtido pelo tratamento mais severo (225°C e 30 min), cerca de 4,02%. Todos os tratamentos estudados apresentaram IE menor que o controle. Contudo, o tratamento mais severo obteve também o maior valor de absorção de água (ABS). Segundo os autores, esse parâmetro pode não ser adequado para caracterizar o aumento de estabilidade dimensional, tendo em vista que ABS pode ser influenciada por espaços vazios no material e dessa forma não provoca inchamento.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 DESCRIÇÃO GERAL

O painel de MDF cru (sem revestimento) foi obtido no comércio madeireiro do Distrito Federal com as dimensões de 275 cm de comprimento, 183 cm de largura e 1,5 cm de espessura. Esse material foi fabricado com o adesivo ureia-formaldeído (UF).

O painel foi cortado em 20 amostras com dimensões de 40 x 40 cm. Estas foram climatizadas nas condições de $20 \pm 3^\circ\text{C}$; $65 \pm 1\%$ de umidade relativa do ar. As amostras permaneceram em climatização até que fosse obtida massa constante. Em seguida, foi realizado um ensaio preliminar de compressão perpendicular ao plano do painel ($f_{c,90^\circ}$) para determinar as pressões aplicadas em cada tratamento. Este ensaio preliminar foi usado para determinar a

pressão máxima suportada pelo material, sendo que para os tratamentos foram usadas 25 e 50% da pressão obtida.

Posteriormente, foi realizada uma avaliação não-destrutiva através de um ensaio de ondas de tensão. Por meio das velocidades obtidas pelo Stress Wave e das densidades de cada um dos painéis climatizados, foram calculados os módulos de elasticidade dinâmico.

Após o cálculo dos módulos de elasticidade dinâmico, os painéis passaram pelos tratamentos termomecânicos e em seguida foram levados para a sala de climatização até que a massa se estabilizasse. O processo de obtenção dos módulos de elasticidade foi repetido nos painéis densificados, após a climatização.

Por fim, foram realizados ensaios mecânicos e físicos nos painéis tratados bem como nas testemunhas, tendo como base a norma ASTM D1037 (1999). A análise dos dados foi obtida por meio dos testes de médias de Dunnett e Tukey, teste t pareado e análise de variância fatorial, todos os testes considerando um nível de significância menor ou igual a 5%.

5.1.1. Ensaio preliminar

O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal (EFL) – UnB, por meio da máquina EMIC DL 30000N e os gráficos foram gerados por meio do software Tesc versão 3.04. Foram usados oito corpos de prova de dimensões 20 x 5 x 1,5 cm e a norma ASTM D143 – 94 (2000) com adaptações para o tipo de material, dimensões e velocidade de carregamento. Foram usadas na termodensificação 25% e 50% da resistência a compressão perpendicular ($f_{c,90^\circ}$) obtida no ensaio.

Após o ensaio, foi calculada a tensão média (σ), que por sua vez foi usada para calcular a pressão de tratamento (P) e a pressão regulada no manômetro (P_m), Equações de 1 a 3.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [1]$$

$$P = \sigma \times 0,25 \text{ e } P = \sigma \times 0,50 \quad [2]$$

$$P_m = P \times \frac{A_p}{551,55} \quad [3]$$

Em que:

σ = tensão em kgf/cm² ou se dividida por 10,19 dada em MPa;

F = carga aplicada sobre a área em kgf;

A = área em que a carga F foi aplicada em cm²;

P = pressão equivalente a 25% e 50% de $f_{c,90^\circ}$ em kgf/cm²;

P_m = pressão ajustada no manômetro em kgf/cm²;

A_p = área do painel em cm².

5.2 TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS

Os procedimentos foram realizados no laboratório de Engenharia e Tecnologia de Produtos Florestais, na Fazenda Água Limpa – FAL/UnB. Foi utilizada uma prensa hidráulica (INDUMEC, 1000kN) com controle de pressão e temperatura (Figura 2) e dimensões 60 x 60 cm, além do conjunto datalogger ICEL Manaus TD-890 e termopar tipo K para registro das temperaturas internas dos painéis a cada 20 segundos. Foram usados quatro painéis de dimensões 40 x 40 cm para cada um dos tratamentos e quatro painéis não passaram por nenhum tratamento, estes foram denominados testemunhas (T0).



Figura 2. Prensa hidráulica usada nos tratamentos termomecânicos.

Foram realizados quatro tratamentos variando entre si pela temperatura e/ou pressão. As pressões usadas foram de 25 ou 50% de $f_{c,90^\circ}$ obtidas no ensaio preliminar e as temperaturas usadas foram 150 e 170°C. Dessa forma os tratamentos foram denominados T1_(150;25), T2_(150;50), T3_(170;25) e T4_(170;50), em que o primeiro número entre parênteses é a temperatura em °C e o segundo a pressão em % (Tabela 1).

Tabela 1. Temperatura e pressão utilizadas em cada um dos tratamentos e testemunhas.

Tratamento	Temperatura (°C)	Pressão (%)
T0 _(0;0)	0	0
T1 _(150;25)	150	25
T2 _(150;50)	150	50
T3 _(170;25)	170	25
T4 _(170;50)	170	50

Os tratamentos termomecânicos consistiram em: colocar o painel na prensa até que a temperatura do tratamento (150 ou 170°C) fosse alcançada na parte interna do painel. Em seguida, a pressão foi mantida constante durante dez minutos, a cada ajuste de prensa foram anotadas a temperatura e tempo. Por fim, foi realizado o pós-tratamento: após os dez minutos de pressão constante, a pressão foi aliviada em 50% durante 5 minutos e após, a pressão foi completamente aliviada por mais 5 minutos. O comportamento da pressão ao longo do tempo pode ser observado na Figura 3.

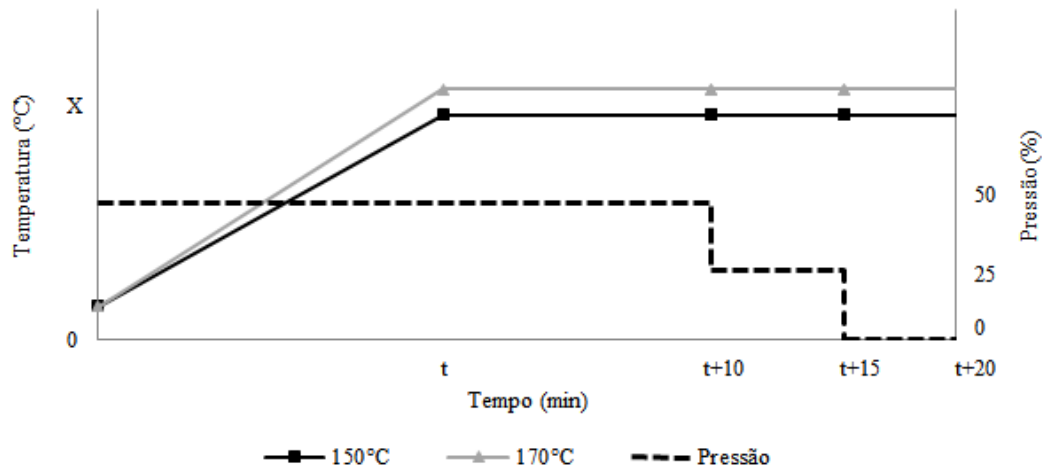


Figura 3. Comportamento da pressão e temperatura ao longo dos tratamentos.

Após os tratamentos, foram calculadas a perda de massa (PM) e as taxas de compactação (TxC) e densificação (TxD) todas dadas em porcentagem, conforme Equações 4, 5 e 6 respectivamente. A densidade apresentada na Equação 6 foi calculada usando a média de espessuras das quatro extremidades dos painéis de 40x40cm e suas respectivas massas. Para tanto, foram utilizados um paquímetro DIGITAL 6" CALIPER 0-150MM de precisão 0,01mm e uma balança MARCONI AS 2000C de precisão 0,01g.

$$PM = \frac{m_a - m_d}{m_a} \times 100 \quad [4]$$

$$TxC = \left(1 - \frac{E_d}{E_a}\right) \times 100 \quad [5]$$

$$TxD = \left(\frac{\rho_d}{\rho_a} - 1\right) \times 100 \quad [6]$$

Em que:

m_a = massa antes do tratamento em g;

m_d = massa após o tratamento termomecânico em g;

E_a e E_d são as espessuras antes e após os tratamento respectivamente em mm;

ρ_a e ρ_d são as densidades antes e após os tratamento respectivamente em g/cm³.

5.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

Para cada um dos ensaios físicos foram utilizados 80 corpos de prova, destes 16 foram destinados para cada um dos tratamentos e 16 para o ensaio das testemunhas. Foi utilizada a norma ASTM D1037 (1990).

5.3.1 Imersão

Para o ensaio inchamento em espessura e absorção de água, os corpos de prova foram cortados nas dimensões 5 x 5 cm.

Foram aferidas massa e espessura em cinco pontos de cada um dos corpos de prova após 2, 4, 8, 16, 24, 48 e 72 horas de imersão em água. Para determinar as espessuras foi utilizado um relógio comparador STARRETT com precisão de 0,001 mm e a massa foi aferida por meio de uma balança MARCONI AS 2000C de precisão de 0,01 g.

Foram calculados o inchamento em espessura (IE) em porcentagem, absorção de água (ABS) em porcentagem, taxas de inchamento em espessura (TxI) em mm/h e absorção de água (TxA) em g/h, Equações 7, 8, 9 e 10 respectivamente.

$$IE = \left(\frac{E_i - E_0}{E_0} \right) \times 100 \quad [7]$$

$$ABS = \left(\frac{m_i - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad [8]$$

$$TxI = \frac{E_i - E_0}{t_i - t_0} \quad [9]$$

$$TxA = \frac{m_i - m_0}{t_i - t_0} \quad [10]$$

Em que:

E_i = espessura média no tempo i em mm, após 2, 4, 8, 16, 24 ou 72h;

E_0 = espessura média antes da imersão em água em mm;

m_0 = massa antes da imersão em água em g;

m_i = massa no tempo i em g.

Em seguida, os corpos de prova foram colocados em uma estufa de circulação forçada de ar, TE 394/2 TECNAL, com temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Esse material foi retirado após a estabilização da massa. A taxa de não retorno em espessura ($TNRE$) em porcentagem foi calculada de acordo com a Equação 11.

$$TNRE = \frac{E_f - E_0}{E_0} \times 100 \quad [11]$$

Em que:

E_f = espessura final, após a estabilização da massa em mm;

E_0 = espessura média antes da imersão em água em mm.

Com a massa estabilizada ao fim do procedimento da estufa e como a massa inicial foi calculada o teor de umidade de equilíbrio (TUE) em porcentagem, Equação 12.

$$TUE = \left(\frac{m_0 - m_f}{m_f} \right) \times 100 \quad [12]$$

Em que:

m_f = massa estabilizada após a estufa em g;

m_0 = massa antes da imersão em água em g;

5.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para cada um dos ensaios mecânicos foram utilizados 80 corpos de prova, destes 16 foram destinados para cada um dos tratamentos e 16 para o ensaio das testemunhas. Foi utilizada a norma ASTM D1037 (1990).

Foram realizados os ensaios de flexão estática, compressão paralela às fibras e Dureza Janka. Para tanto, foi usada a máquina universal de ensaios EMIC com capacidade de 300kN, modelo DL 30000 (Figura 4).

5.4.1. Ensaio de ondas de tensão

Foi utilizado o equipamento *Stress Wave Timer* Metriguard 239A. Este equipamento é composto com um pendulo capaz de gerar ondas de tensão e dois acelerômetros, um de partida e outro de chegada. Ao acionar o pêndulo, o acelerômetro de partida inicia a contagem do tempo e quando a onda chega até a outra extremidade do corpo de prova, onde se encontra acelerômetro de chegada, a contagem é interrompida. Com a distância definida entre os dois acelerômetros e o tempo obtido foi possível calcular a velocidade (Equação 13). Para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, foi necessário obter também a densidade do corpo de prova (Equação 14).

$$v = \frac{d}{t} \times 10^{-6} \quad [13]$$

$$E_d = \frac{v^2 \times \rho}{10^6} \quad [14]$$

Em que:

v = velocidade em m/s;

d = distância em m;

t = tempo em μ s;

ρ = densidade em kg/m³;

E_d = módulo de elasticidade dinâmico em MPa.

Neste ensaio, os acelerômetros ficaram distantes entre si 30 cm e foram medidos três tempos para cada corpo de prova. Dessa forma, foi utilizado o tempo médio para calcular a velocidade (v).

5.4.2. Ensaio destrutivos

a) Resistência à compressão paralela

Para o ensaio de resistência à compressão paralela ao plano do painel foi usada uma largura de 5 cm e comprimento de quatro vezes a espessura média de cada tratamento/testemunha. Nesse ensaio, foi obtida a carga máxima suportada pelo material ($F_{m\acute{a}x}$) em kgf, que dividida pela área representa a resistência a compressão paralela do material ($f_{c,0^\circ}$) em kgf/cm² (equação 15).

$$f_{c,0^\circ} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad [15]$$

Na qual A é a área onde a carga foi aplicada em cm².

b) Dureza Janka

Foram colados dois corpos de prova de dimensões 5 x 5 cm de modo a alcançar a espessura exigida na norma usada. Nesse ensaio, foi obtida a carga (F_H), em newtons, necessária para penetrar metade de uma esfera de 1 cm² na superfície do material.

c) Flexão estática

Foram usados corpos de prova de 40cm de comprimento e 5cm de largura. Foram obtidos os módulos de ruptura (f_m) e de elasticidade (E_M), conforme as Equações 16 e 17 respectivamente.

$$f_m = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h^2} \quad [16]$$

$$E_M = \frac{P_i \times L^3}{4 \times \Delta \times b \times h^3} \quad [17]$$

Em que:

P = carga máxima em kgf;

L = tamanho do vão em cm;

b = comprimento do corpo de prova em cm;

h = altura do corpo de prova em cm;

P_i = carga em kgf referente a deformação Δ em cm.

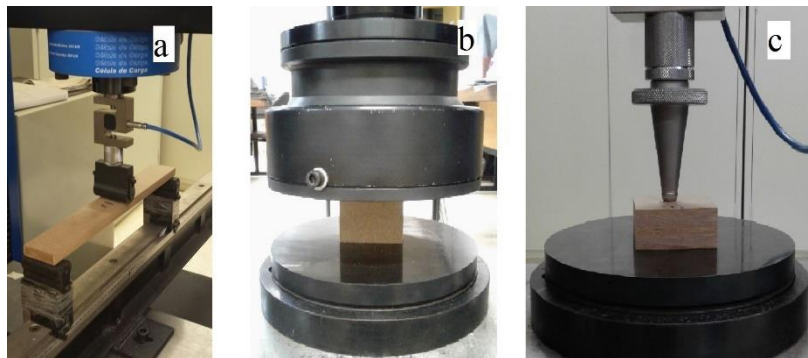


Figura 4. Ensaio mecânico: a) Flexão estática, b) Dureza Janka, c) Compressão paralela ao plano do painel.

5.5 ANÁLISE DO EXPERIMENTO

Para a análise do experimento, foi realizada análise de variância (ANOVA), teste de médias, comparações descritivas e análise fatorial, por meio do programa SPSS 20.0.

A comparação dos dados de perda de massa (PM), taxa de compactação (TxC) e taxa de densificação (TxD) foi feita por meio do teste de Tukey com significância de 5% de probabilidade. Os resultados do ensaio de ondas de tensão antes e depois dos tratamentos foram comparados por meio do teste T-pareado com significância de 5% de probabilidade. Para as

demais propriedades foi usado o teste de Dunnett, considerando um nível de significância menor ou igual a 5%.

Por fim, foi analisada a influência dos fatores pressão e temperatura em cada um dos tratamentos por meio da ANOVA fatorial.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 TRATAMENTO TERMOMECÂNICO

A densidade média do material antes dos tratamentos e após a sua climatização foi de aproximadamente $698,52\text{kg/m}^3$ e o coeficiente de variação foi de aproximadamente de 0,6%. Já o teor de umidade de equilíbrio foi de aproximadamente 9% com coeficiente de variação de 0,07%.

A tensão máxima encontrada no ensaio preliminar de resistência à compressão perpendicular do painel ($f_{c,90^\circ}$) foi de 80 kgf/cm^2 , dessa forma, os valores de 25 e 50% foram de 20 e 40 kgf/cm^2 ou 2 e 4 MPa aproximadamente. As pressões ajustadas no manômetro da prensa hidráulica foram de 60 e 120 kgf/cm^2 , referentes à 25 e 50% da $f_{c,90^\circ}$ respectivamente.

Os tratamentos tiveram uma duração média de 36 minutos, variando de 34 minutos até 40 minutos. A medida em que se aumentou a temperatura e a pressão, foi obtida uma redução no tempo de tratamento, dessa forma o tratamento de menor pressão e temperatura - T1(150;25) - apresentou a maior média de duração de tratamento, já o tratamento de condições mais severas - T4(170;50) - apresentou o menor tempo. A maior taxa de aquecimento foi obtida, para todos os tratamentos, nos primeiros três minutos, isso ocorreu devido a presença de água no material. Quando a temperatura próxima à de ebulição da água (100°C) foi atingida, a taxa de aquecimento reduziu de forma considerável.

A Figura 5 mostra a variação da temperatura no interior das amostras ao longo dos quatro tratamentos. Os valores são compostos por médias das amostras ao longo de cada tratamento. Foi observado que os tratamentos de maior temperatura (170°C) obtiveram uma evolução mais rápida da temperatura no interior das amostras em relação aos tratamentos de menor temperatura (150°C), este resultado também foi obtido por Del Menezzi (2004).

Foi possível observar três fases de aquecimento: a primeira caracterizada pela alta taxa de aquecimento, a segunda por uma menor taxa de aquecimento, começando quando o material

atingiu uma temperatura próxima aos 100°C e por fim, a terceira fase caracterizada pela estabilização da taxa de aquecimento, quando foi atingida a temperatura do tratamento (150°C ou 170°C). Estas três fases também foram observadas por Del Menezzi (2004).

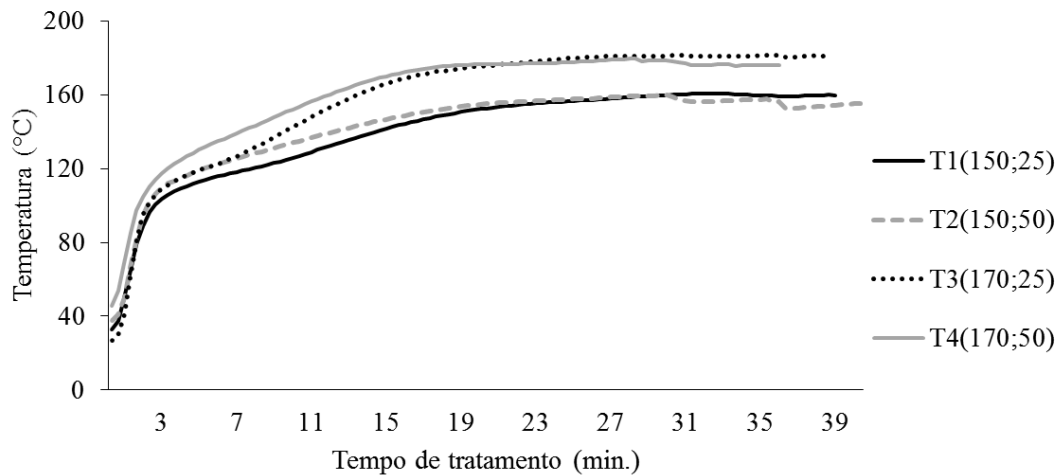


Figura 5. Variação da temperatura no interior das amostras ao longo dos quatro tratamentos.

A Figura 6 mostra um corpo de prova ao final de cada um dos tratamentos e um corpo de prova da testemunha.

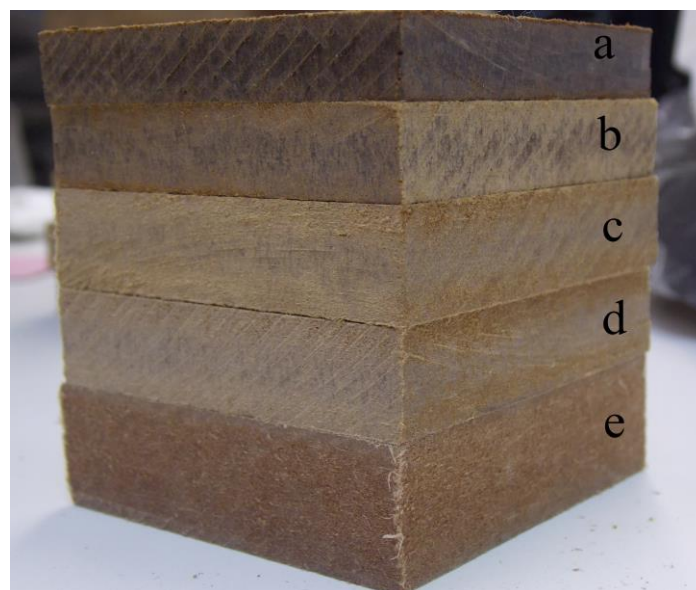


Figura 6. Amostras dos quatro tratamentos e da testemunha: a) representa T4(170;50), b) T3(170;25), c) T2(150;50), d) T1(150;25) e por fim, e) representa a testemunha.

O teste de Tukey (Figura 7a) mostrou que para a taxa de densificação, os tratamentos T1(150;25) e T3(170;25) não diferiram estatisticamente entre si e apresentaram os menores valores, 29,95% e 34,03%, respectivamente. Os tratamentos T2(150;50) e T4(170;50) não diferiram

estatisticamente entre si, representando os maiores valores. A Tabela 2 mostra a influência da temperatura e pressão para esta propriedade, os aumentos de ambos contribuíram para um aumento da taxa de densificação, contudo, o aumento da pressão apresentou o maior valor. Não foi observada interação entre os fatores.

Para a taxa de compactação (Figura 7b), todos os tratamentos diferiram estatisticamente entre si. A maior TxC (37,87%) foi obtida pelo tratamento T4_(170;50) e a menor TxC (28,10%) foi obtida pelo tratamento T1_(150;25). Para essa propriedade, ambos os aumentos, em pressão e em temperatura, acarretam o seu aumento, muito embora, o aumento de pressão tenha se mostrado mais eficiente. Não houve interação entre os fatores pressão e temperatura para esta propriedade.

Segundo Callister (2000), o aumento da temperatura desempenha importante papel no amolecimento de polímeros amorfos, caracterizando a temperatura de transição vítrea (T_g). Nesta fase, segundo Mano e Mendes (1990), os polímeros passam de um estado rígido para um estado borrachoso, de maior mobilidade. Com essa perda de rigidez durante a T_g, a pressão atua de forma a reduzir a espessura do material, sendo fundamental para a densificação.

Para a perda de massa (Figura 7c), os tratamentos T1_(150;25) e T2_(150;50) (ambos com temperatura de 150°C) não diferiram estatisticamente entre si. A maior perda de massa (9,20%) foi obtida no tratamento de maior pressão e temperatura - T4_(170;50). A análise fatorial (Tabela 2) mostrou que os aumentos de pressão e de temperatura provocaram um aumento da perda de massa, contudo, o maior foi obtido pelo aumento da temperatura. A influência da temperatura para a perda de massa pode ser explicada pela degradação térmica dos polímeros constituintes. Segundo Schaffer (1973), a lignina começa a perder peso a 110°C, aos 120°C o teor de hemicelulose começa a reduzir, a celulose alfa começa a aumentar e a lignina passa a amolecer.

Não houve interação estatisticamente significativa para perda de massa entre os fatores pressão e temperatura.

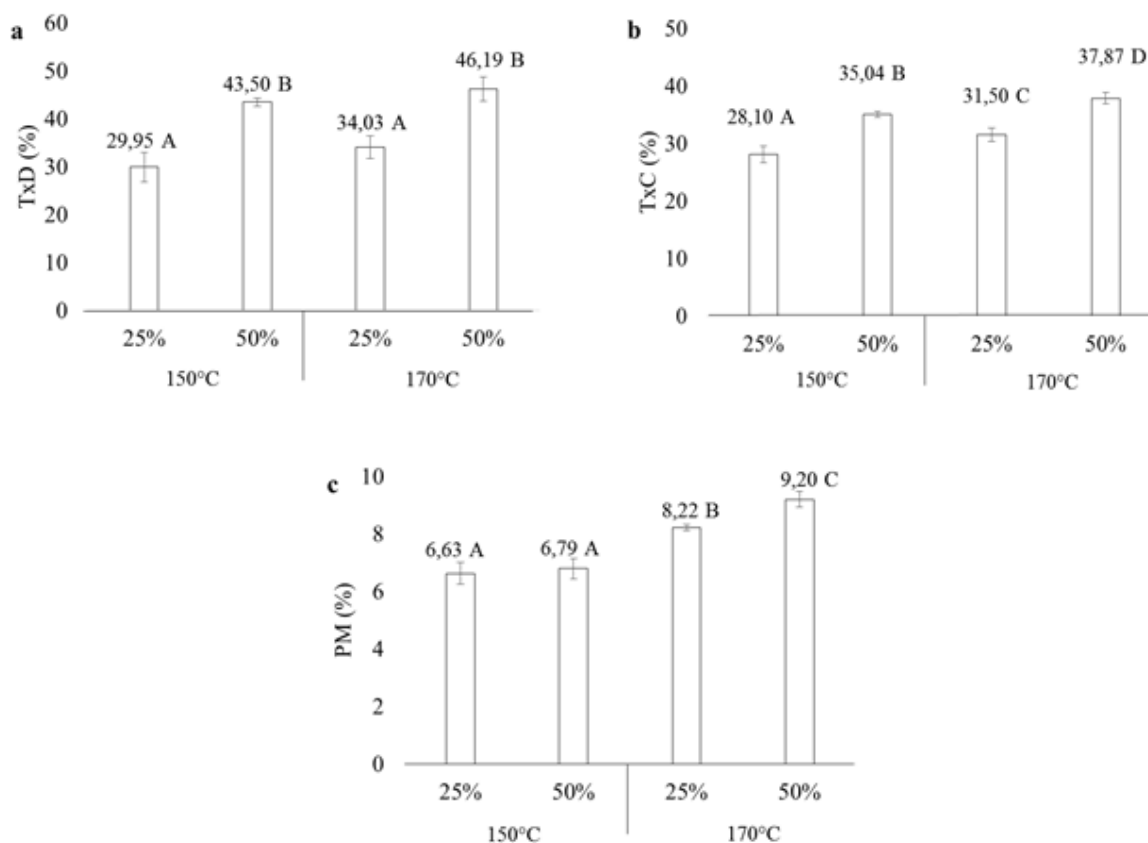


Figura 7. Valores médios para a) taxas de densificação, b) compactação e c) perda de massa. Teste de média por meio de Tukey com nível de significância de 5%, em que letras diferentes representam valores estatisticamente distintos.

Tabela 2. Valores médios para taxa de densificação, taxa de compactação e perda de massa considerando a influência da pressão e temperatura.

Propriedade (%)	Fator			
	Temperatura (°C)		Pressão (%)	
	150	170	25	50
TxD	36,73* (18,43)	40,11* (15,16)	31,99** (10,03)	44,85** (4,50)
TxC	31,57** (10,99)	34,69** (9,19)	29,8** (6,54)	36,46** (3,87)
PM	6,71** (5,51)	8,71** (5,85)	7,42* (10,65)	8,00* (15,00)

* valores significativos ao nível de 5%; ** valores significativos ao nível de 1%; valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação em %.

A absorção de água pelos corpos de prova no ensaio de imersão em água foi monitorada ao longo do tempo por meio das taxas de inchamento (TxI) e absorção de água (TxA), Figuras

8 e 9 respectivamente. Ambas as figuras mostram um pico após duas horas de ensaio. Para TxI, o maior pico foi obtido pelo T2_(150;50) (0,72 mm/h), já o menor (0,38 mm/h) foi obtido pelas testemunhas (NT).

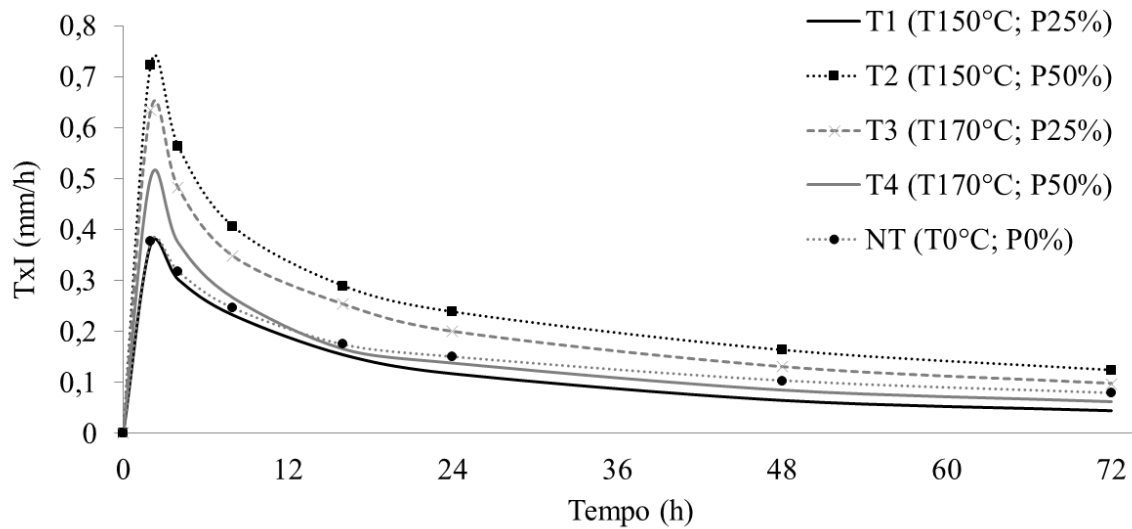


Figura 8. Taxa de inchamento em espessura ao longo de 72h.

Para TxA, o maior pico (1,82 g/h) foi obtido pelas testemunhas, já o menor (0,62 g/h) pelo T4_(170;50). O aumento da densidade provocado pelos tratamentos (Figura 10) mostra que a redução de espaços vazios nos tratamentos em relação às testemunhas contribuiu para uma menor absorção de água.

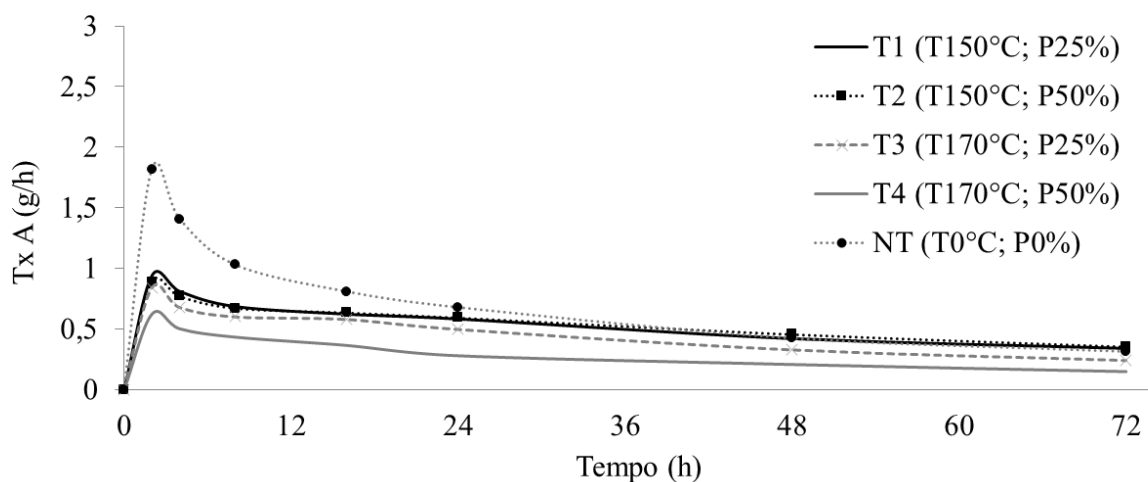


Figura 9. Taxa de absorção de água ao longo de 72h.

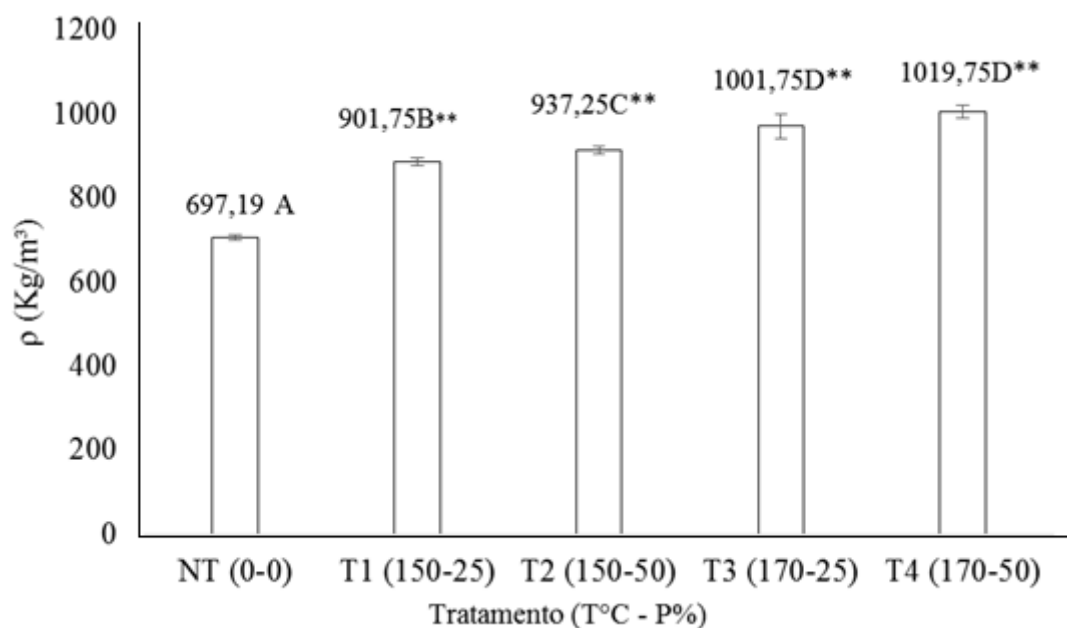


Figura 10. Comparação entre as médias de densidade, teste de Tukey e Dunnett. Nota: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância e ** representa diferença significativa em relação à testemunha, em relação ao teste de Dunnett.

6.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

A Tabela 3 apresenta as médias e desvios padrões médios para as propriedades de inchamento em espessura (*IE*), absorção de água (*ABS*), teor de umidade de equilíbrio (*TUE*) e taxa de não retorno em espessura (*TNRE*). A *TNRE* deriva da liberação das tensões internas de compressão e expressa o aumento em espessura definitivo do material (DEL MENEZZI, 2004).

Em relação à testemunha não houve diferença estatisticamente significativa para *ABS* após 72h para T1_(150;25), *TUE* para T1_(150;25) e T3_(170;25) e para *TNRE* para T4_(170;50).

Foi observado um aumento de *IE* para todos os tratamentos em relação à testemunha, durante todo o ensaio de imersão. O tratamento T2_(150;50) apresentou os maiores valores durante todo o ensaio, o maior valor absoluto dos tratamentos foi observado em 72h, cerca de 88,96%. Os menores valores dos tratamentos foram obtidos por T4_(170;50), sendo o menor valor absoluto dos tratamentos igual a 10,8% em 2h. Para a testemunha, o menor valor foi obtido em 2h (4,92%) e o maior em 72h (37,32%). Segundo ANSI-A 208.2 (2002), o máximo de *IE* após 24h deve ser de 10%, requisito não atingido pelas testemunhas e tão pouco pelos tratamentos. Esse pré-requisito também não foi atendido por Garcia *et al.* (2006) que fabricaram painéis de MDF com fibras tratadas termicamente. Os tratamentos usados foram a combinação de duas

temperaturas (150 e 180°C), três tempos (15, 30 e 60 min.) e o adesivo usado foi ureia-formaldeído (UF). Segundo os autores, isso pode ser explicado pelo aumento do efeito de borda causado pelo tamanho reduzido dos corpos de prova.

Já para *ABS* em 2 e 24h, observou-se uma redução para todos os tratamentos em relação à testemunha. Para *ABS* em 72h, houve um aumento para T2_(150;50) e redução para T3_(170;25) e T4_(170;50).

Tabela 3. Valores médios das propriedades físicas.

Parâmetro (%)	Tratamento (T°C - P%)				
	NT 0-0	T1 150 - 25	T2 150 - 50	T3 170 - 25	T4 170 - 50
<i>IE 2h</i>	4,92 (11,99)	12,03** (6,15)	13,73** (10,34)	11,54** (14,64)	10,8** (15,74)
<i>IE 24h</i>	23,43 (2,39)	46,42** (5,36)	57,09** (8,77)	43,54** (16,03)	36,36** (27,42)
<i>IE 72h</i>	37,32 (2,84)	72,07** (4,95)	88,96** (7,26)	63,81** (19,43)	49,51** (28,76)
<i>ABS 2h</i>	13,22 (23,15)	6,89** (9,72)	6,42** (17,91)	6,30** (18,89)	4,77** (20,96)
<i>ABS 24h</i>	58,96 (2,85)	51,73** (2,30)	52,64* (9,90)	44,81** (19,44)	25,67** (35,53)
<i>ABS 72h</i>	81,9 (2,69)	90,51 ^{NS} (4,71)	94,05** (9,47)	63,37** (22,31)	40,89** (38,86)
<i>TUE</i>	8,88 (1,35)	9,07 ^{NS} (1,76)	9,23* (2,49)	8,62 ^{NS} (4,99)	7,99** (5,13)
<i>TNRE</i>	11,52 (16,93)	57,3** (13,73)	79,36** (29,14)	36,14** (45,02)	17,83 ^{NS} (58,83)

*, ** significantes a $\alpha=0.05$ e $\alpha=0,01$ respectivamente e NS representa uma diferença não significativa em relação a testemunha, de acordo com o teste de Dunnett; valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação em %.

A Tabela 4 mostra a análise fatorial para os fatores pressão e temperatura. Houve interação para *IE* nos três tempos, para *ABS* em 24 e 72h, para *TUE* e *TRNE*. Para inchamento em espessura, o aumento de temperatura ocasionou uma redução dessa propriedade, o mesmo ocorreu para *ABS*. Para *TUE*, tanto o aumento de pressão quanto o de temperatura acarretaram em redução dessa propriedade. Já para *TNRE* o aumento de temperatura provocou uma redução dessa propriedade e o aumento de pressão não mostrou diferença significativa.

Tabela 4. Valores médios das propriedades físicas considerando a influência da pressão e temperatura.

Parâmetro (%)	Fator			
	Temperatura (°C)		Pressão (%)	
	150	170	25	50
<i>IE 2h</i>	12,63** (9,50)	11,10** (15,31)	11,66 ^{NS} (11,75)	11,90 ^{NS} (16,39)
<i>IE 24h</i>	50,47** (10,54)	39,54** (24,13)	44,30 ^{NS} (12,69)	44,45 ^{NS} (28,14)
<i>IE 72h</i>	80,34** (10,47)	55,85** (27,63)	67,48 ^{NS} (16,14)	65,89 ^{NS} (34,53)
<i>ABS 2h</i>	6,70** (11,94)	5,51** (21,96)	6,51** (15,36)	5,56** (21,76)
<i>ABS 24h</i>	51,89** (8,00)	34,76** (37,83)	47,45** (15,95)	37,22** (42,29)
<i>ABS 72h</i>	92,33** (7,35)	52,40** (36,98)	76,14** (23,19)	63,98** (46,64)
<i>TUE</i>	9,11** (2,19)	8,31** (6,38)	8,80* (4,54)	8,53* (8,09)
<i>TNRE</i>	67,57** (30,66)	26,38** (63,30)	45,00 ^{NS} (38,42)	44,19 ^{NS} (80,36)

*, ** significantes a $\alpha=0.05$ e $\alpha=0,01$ respectivamente e NS representa uma diferença não significativa; valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação em %.

As Figuras 11 e 12 mostram os gráficos de interação para as propriedades físicas. Para inchamento em espessura, T2_(150;50) apresentou os maiores resultados em todos os tempos, se mostrando o tratamento menos eficiente para conter as tensões internas. Para IE 2h, como os tratamentos T1_(150;25), T3_(170;25) e T4_(170;50) não diferiram estatisticamente entre si, dessa forma, o melhor resultado foi obtido por T1_(150;25), por apresentar menores pressão e temperatura.

Para IE 24h e 72h, o melhor resultado foi obtido por T4_(170;50), por apresentar menor valor de IE. Foi observado que para a temperatura de 150°C o aumento da pressão de 25% para 50% acarretou em um aumento da temperatura. Em contrapartida, para a temperatura de 170°C, o aumento de pressão resultou em uma redução do inchamento em espessura. Logo, como o intuito é a redução de IE, o tratamento mais severo - T4_(170;50) - é o mais indicado.

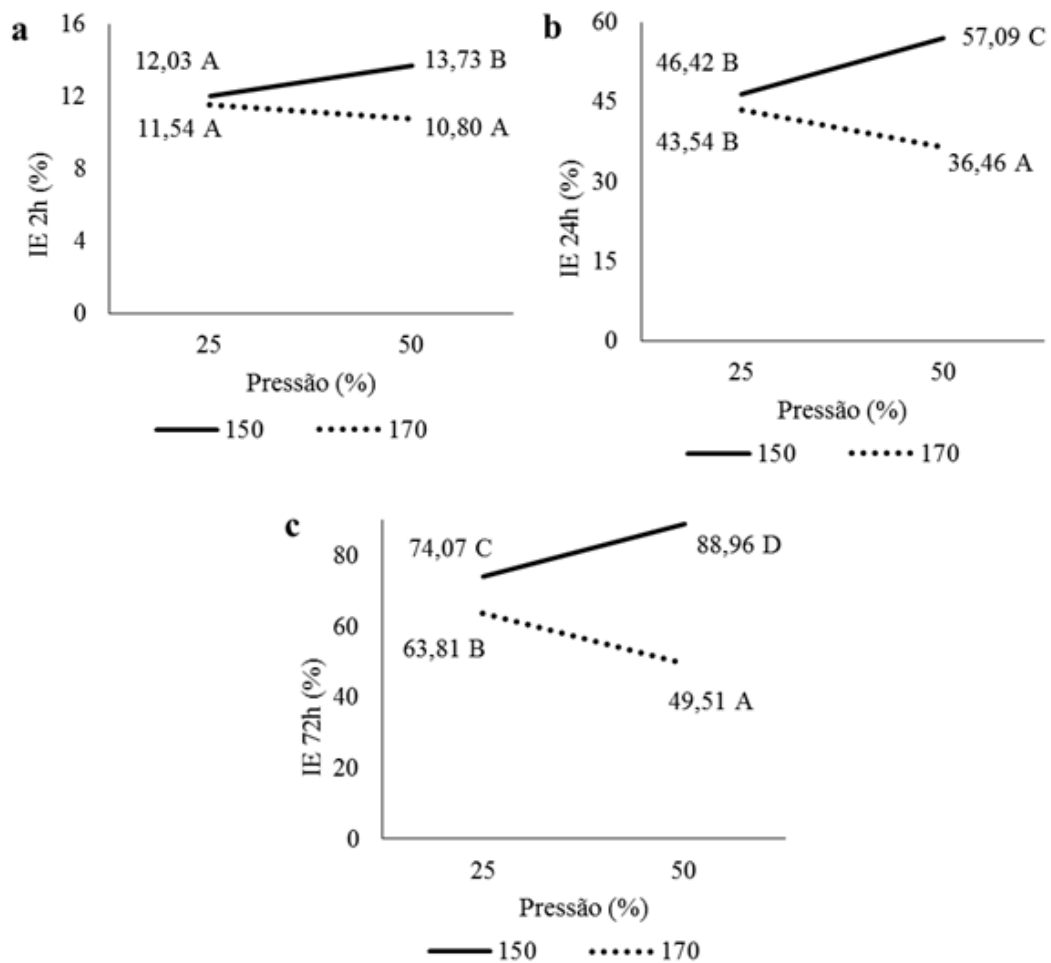


Figura 11. Interação entre temperatura e pressão para inchamento em espessura, a) em 2h; b) em 24h e c) em 72h de imersão.

Para ABS (Figura 12a), tratamento T4_(170;50) apresentou os menores valores e T1_(150;25) e T2_(150;50) os maiores valores. O aumento de pressão aliado ao aumento de temperatura foi efetivo para reduzir esta propriedade. Foi observado que para a temperatura de 150°C o aumento da pressão de 25% para 50% não acarretou em diferença estatisticamente significativa. Em contrapartida, para a temperatura de 170°C, o aumento de pressão resultou em uma redução de ABS.

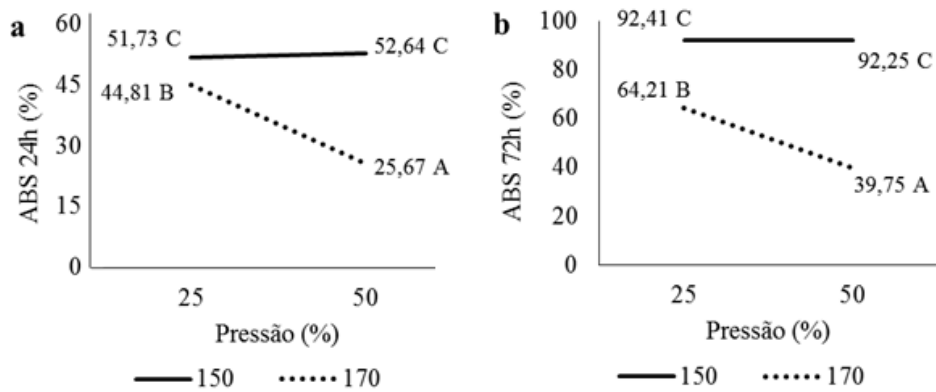


Figura 12. Interação entre temperatura e pressão para absorção de água: a) em 24h e b) em 72h de imersão.

Para o teor de umidade (Figura 13a), $T1_{(150;25)}$ e $T2_{(150;50)}$ não diferiram entre si, representando os maiores valores. Foi observado que para a temperatura de 150°C, o aumento de pressão não resultou em diferenças estatisticamente significativas. Entretanto, para a temperatura de 170°C, o aumento de pressão foi eficiente em reduzir TUE de forma significativa.

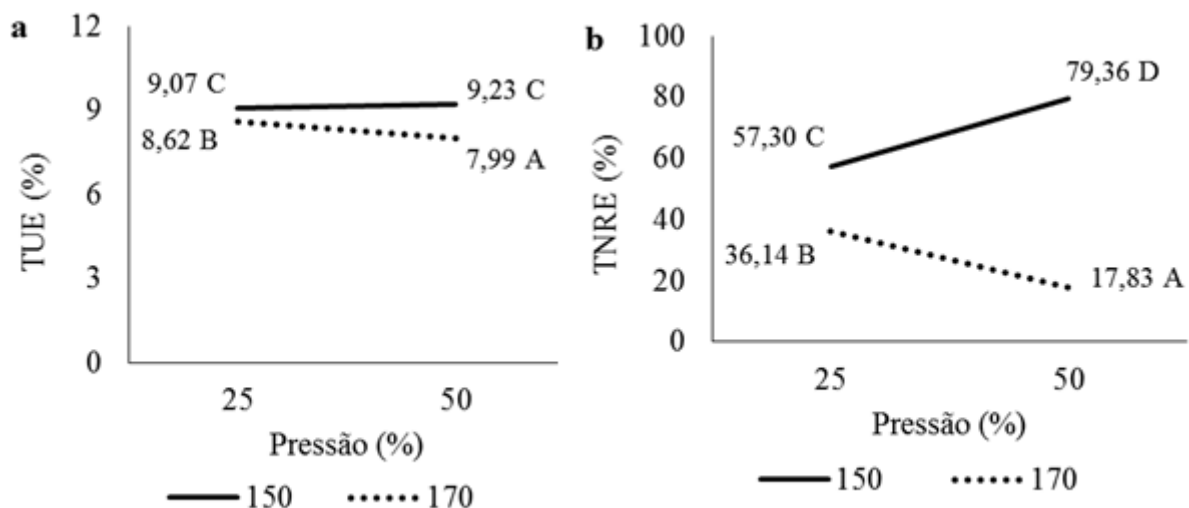


Figura 13. Interação entre pressão e temperatura para a) Teor de umidade de equilíbrio e b) Taxa de não retorno em espessura.

Para TNRE (Figura 13b), a menor temperatura aliada a maior pressão - T2(150;50) – se mostrou menos eficiente para a contenção das tensões internas. Por outro lado, o aumento de pressão aliado ao aumento de temperatura - T4(170;50) – apresentou os melhores resultados neste aspecto. Para a temperatura de 150°C, o aumento da pressão resultou em um aumento da TNRE, e o oposto ocorreu para a temperatura de 170°C.

6.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

6.3.1 Ensaio de ondas de tensão

A Tabela 5 mostra que todos os tratamentos obtiveram maiores valores de densidade, velocidade e módulo de elasticidade dinâmico em relação às testemunhas. Os maiores ganhos foram obtidos por T4(170;50), representando um aumento de 44% para densidade (ρ), 22% para velocidade (v) e 115% para módulo de elasticidade dinâmico (Ed). Já os menores ganhos foram obtidos por T1(150;25), representando um aumento de 27% para densidade, 13% para velocidade e 64% para módulo de elasticidade dinâmico.

Del Menezzi *et al.* (2007) realizaram tratamentos termomecânicos em OSB, combinando duas temperaturas (190 e 220°C) e três tempos (12, 16 e 20 minutos). Segundo os autores, temperatura mais elevada e tratamento mais longo implicam em alterações maiores. Segundo Han *et al.* (2006), a existência de espaços vazios e descontinuidades em materiais compostos podem influenciar a propagação da onda de forma a dissipá-la e dessa forma, aumentar o seu tempo de propagação. Logo, todos os tratamentos foram efetivos em reduzir os espaços vazios e descontinuidades no MDF.

Tabela 5. Valores médios antes e depois dos tratamentos para densidade, velocidade, módulo de elasticidade.

Propriedade	Tratamento (°C - %)			
	T1 (150 - 25)	T2 (150 - 50)	T3 (170 - 25)	T4 (170 - 50)
ρ antes (Kg/m ³)	695,36	697,97	701,50	697,62
ρ depois (Kg/m ³)	887,21**	970,33**	913,39**	1006,69**
v antes (m/s)	2133,11	2179,25	2139,20	2177,92
v depois (m/s)	2421,05**	2540,60**	2457,50**	2657,11**
Ed antes (MPa)	3163,59	3315,00	3201,88	3309,09
Ed depois (MPa)	5200,54**	6263,33**	5516,72**	7109,92**

** significativa a $\alpha = 0,01$, de acordo com o teste t-pareado.

6.3.2 Ensaios destrutivos

Para os ensaios mecânicos realizados, o único resultado que não diferiu estatisticamente da testemunha foi a compressão paralela ($F_{c,0^\circ}$) para T3_(170;25). Para todas as outras propriedades houve um aumento em relação às testemunhas (Tabela 6).

O módulo de ruptura em flexão estática (f_m) é a propriedade mais afetada de madeiras tratadas com altas temperaturas (BEKHTA & NIEMZ; 2003), o que não ocorreu com o tratamento termomecânico realizado no presente trabalho, representando um ganho de até 89% - T4_(170;50) em relação a testemunha - (Tabela 6), sendo assim, uma alternativa para reduzir perdas do f_m . Para esta propriedade, o menor aumento foi obtido por T1_(150;25) (23,9%), seguido T3_(170;25) (35,6%) e por T2_(150;50) (64,7%).

Para o módulo de elasticidade, o maior aumento foi de 54% - T2_(150;50) em relação a testemunha. O menor aumento foi obtido por T1_(150;25) (27,7%), seguido por T3_(170;25) (36,2%) e T4_(170;50) (50%).

Para Dureza Janka (f_H), o maior aumento ocorreu para T4_(170;50), cerca de 280% em relação à testemunha. O menor aumento foi obtido por T1_(150;25) (155%), seguido por T3_(170;25) (171,4%) e T2_(150;50) (249,6%).

Tabela 6. Valores médios das propriedades mecânicas.

Parâmetro	Tratamentos (°C - %)				
	T0	T1	T2	T3	T4
	(0 - 0)	(150 - 25)	(150 - 50)	(170 - 25)	(170 - 50)
f_m (MPa)	26,92 (4,79)	33,36** (6,05)	44,35** (10,53)	36,51** (10,46)	50,85** (11,54)
E_M (MPa)	3798,98 (2,01)	4852,39** (6,17)	5840,10** (13,08)	5176,35** (10,7)	5700,51** (5,94)
f_H (N)	4518,94 (5,22)	11523,29** (6,48)	15798,06** (10,16)	12265,82** (6,37)	17159,77** (3,33)
$f_{c,0^\circ}$ (MPa)	15,18 (9,88)	20,9** (18,90)	22,42** (13,38)	17,62 ^{NS} (15,83)	18,69** (12,52)

*, ** significantes a $\alpha=0.05$ e $\alpha=0,01$ respectivamente e NS representa uma diferença não significativa em relação a testemunha, de acordo com o teste de Dunnett; valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação em %.

Como não houve interação para nenhuma das propriedades mecânicas, pode-se inferir (Tabela 6) que o aumento de temperatura não provocou diferenças significativas para o módulo de elasticidade (E_M), já o aumento de pressão aumentou essa propriedade em cerca de 7,6%.

Para módulo de ruptura (f_m) tanto o aumento de pressão quanto o aumento de temperatura se mostraram efetivos para o aumento desta propriedade. O aumento de temperatura apresentou um aumento de 8,9%, já a pressão um aumento de 20%. O aumento de temperatura se mostrou mais efetivo para f_m que para E_M , resultado também obtido por Moura *et al.*, (2012). Segundo os autores, madeiras tratadas com altas temperaturas tendem a deformar menos, apresentando rupturas mais frágeis.

Para compressão paralela ($f_{c,0^\circ}$), o aumento de pressão não se mostrou significativo e o aumento da pressão reduziu a esta propriedade em cerca de 16,4%. Para Dureza Janka (f_H), o aumento de temperatura apresentou um aumento de 5,6%, já a pressão um aumento de 20%.

Tabela 7. Valores médios das propriedades mecânicas considerando a influência da pressão e temperatura.

Propriedade	Fator			
	Temperatura (°C)		Pressão (%)	
	150	170	25	50
f_m (MPa)	38,86** (17,01)	42,33** (18,99)	34,94** (9,76)	46,65** (12,15)
E_M (MPa)	5346,69 ^{NS} (14,22)	5385,66 ^{NS} (9,68)	5014,37** (9,34)	5752,36** (10,63)
f_H (N)	13660,67** (18,27)	14428,26** (17,60)	11894,6** (7,07)	16377,1** (8,56)
$f_{c,0}$ (MPa)	21,66** (16,34)	18,1** (14,42)	19,25 ^{NS} (19,53)	20,75 ^{NS} (15,81)

*, ** significantes a $\alpha=0.05$ e $\alpha=0,01$ respectivamente e NS representa uma diferença não significativa; valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação em %.

7 CONCLUSÕES

Todos os tratamentos termomecânicos foram eficientes no aumento da densidade do MDF, sendo o maior aumento decorrente do tratamento mais severo e o menor aumento decorrente do menos severo, respectivamente 30% e 46% em relação à testemunha.

Nenhum tratamento foi eficiente para reduzir o inchamento em espessura. De forma geral, o tratamento de menores valores para inchamento em espessura, absorção de água, taxa de não retorno em espessura e teor de umidade foi T4_(170;50), sugerindo que este foi o melhor tratamento para o controle da instabilidade dimensional, o pior, por sua vez, foi T2_(150;50). A interação entre pressão e temperatura indica que o aumento dos dois fatores de forma simultânea contribui para a melhoria das propriedades físicas.

Para as propriedades mecânicas, T4_(170;50) apresentou os maiores valores para módulo de ruptura e Dureza Janka, já T2_(150;50) apresentou os maiores valores para módulo de elasticidade e compressão paralela. De forma geral, aumento de pressão se mostrou mais efetivo que o aumento da temperatura para o ganho nas propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15316-2**: Chapas de fibras de média densidade. Parte 2: Requisitos. Rio de Janeiro, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1554**: Definitions of terms relating to wood-base fiber and particle panel material. Philadelphia: 1974.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1037**: Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. Philadelphia: 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. **ASTM D143** – 94 (Reapproved 2000), 2000.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI standard **A208-2**: Medium density fiberboard (MDF) for interior applications. 2002.

ARAÚJO, S. O. **Propriedades de madeiras termorretificadas**. Tese de doutorado em Ciências Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 77p. 2010.

AYRILMIS, N.; LAUFENBERG, T. L.; WINANDY, J. E. Dimensional stability and creep behavior of heat-treated exterior médium density fiberboard. **Eur. J. Wood Prod.**, v. 67, p.-287-295, 2009.

AYRILMIS, N.; WINANDY, J. E. Effects of post heat-treatment on surface characteristics and adhesive bonding performance of Medium Density Fiberboard. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 24, p. 594-599, 2009.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood. **Holzforschung**. v. 57. n. 5, p. 539-546, 2003.

BORGES, L. M.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

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

CALLISTER, W. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Grupo Gen-LTC, 2000.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. MDF – processo de produção, propriedades e aplicações. In: “**Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**”, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. De 9 a 13 de novembro de 2002.

DEL MENEZZI, C. H. S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DEL MENEZZI, C. H. S; TOMASELLI, I.; SOUZA, M. R. Avaliação não-destrutiva de painéis OSB modificados termicamente: parte 1- efeito do tratamento térmico sobre a velocidade de propagação de ondas de tensão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 67-75, dez. 2007.

ELEOTÉRIO, J. R.; TOMAZELLO, M. F.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis de MDF de diferentes densidades e teores de resina. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 75-90, 2000.

EUROPEAN COMMITTEE STANDARDIZATION. **European Standard EN 622-5**. Fiberboards. Specifications. Requirements for dry process boards (MDF). Bruxelas, 2006.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison, Wisconsin, 2010.

GARCIA, R. A. **Amélioration de la stabilité dimensionnelle des panneaux de fibre de bois MDF par traitements physico-chimiques**. 206p. Tese (Doctorat en sciences du bois) – Université Laval, Faculté de Foresterie et Géomatique, Québec, 2005.

GARCIA, R. A.; CLOUTIER, A.; RIEDL, B. Dimensional stability of MDF panels produced from heat-treated fibres. **Holzforschung**, v. 60, p. 278-284, 2006.

GEIBLER, E. Dimensional stabilization of wood by moisture-heat-pressure treatment, **Holz Roh Werkstoff** v.41, p. 87-94, 1983.

HAN, G.; WU, Q.; WANG, X. Stress-wave velocity of wood-based panels: effect of moisture, product type, and material direction. **Forest Products Journal**, Madison, v.56, n.1, p.28-33, 2006.

HILL, C. A. S. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. John Wiley & Sons, 2007.

HSU, W. E.; SCHWALD, W.; SHIELDS, J. A. Chemical and physical changes required for producing dimensionally stable wood-based composites. **Wood Science and Technology**, v. 22, p. 281-289. 1988.

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

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood Science and technology II: Wood Based Materials**. New York: Springer-verlag, 702p., 1975.

LEHMANN, W. F. Retarding dimensional changes of particleboard. Information Circular. **Forest Research Laboratory, Oregon State Univ**, 1964.

LESSMANN, V. E. **Estudo da reação de cura de resinas ureia-formol por espectrometria de ressonância magnética nuclear**. 221p. Dissertação (Mestrado em Química) - Faculdade de Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LUNGULEASA, A.; SPÎRCHEZ, C. The characteristics of thermally treated MDF panels. Bulletin of the Transilvania University of Brasov, **Series II: Forestry**, v. 8, 2015.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1990.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; LACERDA, F. C. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES setorial, Rio de Janeiro**, n. 27, p. 121-156, 2008.

MORSING, N. **Densification of Wood The Influence of Hygrothermal Treatment on Compression of Beech Perpendicular to The Grain**. Technical University Of Denmark, 146p. 2000.

MOURA, L. F. BRITO, J. O. Efeito da termorretificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* woods. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 69-76, mar. 2011.

MOURA, L.F.; BRITO, J.O.; JUNIOR, G.B. Efeitos da termorretificação na perda de massa e propriedades mecânicas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 2, p. 305 - 314, 2012.

OKINO, E. Y. A.; TEIXEIRA, D. E.; DEL MENEZZI, C. G. S. Post-thermal treatment of Oriented Strandboard (OSB) made from Cypress (*Cupressus glauca* Lam.). **Maderas: Ciencia y tecnologia**, v. 9, n. 3, p. 199-210, 2007.

PONCKÁK, S.; KOCAEFE, D.; MOHAMED, B.; PICHETTE, A. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Sci. Technol.**, v. 40, n. 1, p. 647-663, 2006.

RECORD, S. J. **The mechanical properties of wood**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1914. 136 p.

ROWELL, R.; LANGE, S.; MCSWEENEY, J.; DAVIS, M. Modification of wood fiber using steam. **Modification of Cellulosics**, v. 2, p. 606-615, Portland, Estados Unidos, 2002.

SCHAFFER, E. L. Effect of Pyrolytic Temperatures on the Longitudinal Strength of Dry Douglas Fir. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 1, n. 4, p319-329, 1973.

SEBORG, R. M.; MILLETT, M. A.; STAMM, A. J. **Heat-stabilized compressed wood (Staypak)**. FPL, n. 1580, 22p., 1962.

STAM, A. J. **Wood and cellulose Science**. New York: Ronald Press, 1964. 549 p.

TOMEK, A. Heat treatment of wood chips: *a new process for making particle board water repellente*. **Holz Technology** 7, p. 157-160, 1966.

WANDSCHEER, R. B.; BRESSAN, J.; MELO, R. R.; LIMA, D, C.; PEDROSA, T. D.; FERREIRA, M. D. Thermal treatment effect on physical and mechanical properties of MDF panels. **Nativa**, v. 4, p. 71-76, 2016.

WINANDY, J., E. Wood Properties. **Encyclopedia of Agricultural Science**. Academic Press: 549-561. Vol. 4. 1994.

YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment**, v. 41, n. 1, p. 1762-1766, 2006.

APÊNDICE 1 – TRATAMENTO TERMOMECÂNICO: TAXA DE DENSIFICAÇÃO, TAXA DE COMPACTAÇÃO E PERDA DE MASSA

Descriptive Statistics

Temperatura		Mean	Std. Deviation	N	
Pm	150	25	6.630983	.5328576	4
		50	6.793983	.4904085	4
		Total	6.712483	.4820272	8
	170	25	8.219123	.1212380	4
		50	9.205254	.3883488	4
		Total	8.712189	.5905746	8
Total	25	7.425053	.9212018	8	
	50	7.999619	1.3523737	8	
	Total	7.712336	1.1565234	16	
TxC	150	25	28.104342	1.9652363	4
		50	35.045889	.7806088	4
		Total	31.575115	3.9602426	8
	170	25	31.500729	1.3883959	4
		50	37.874737	1.1535284	4
		Total	34.687733	3.6061609	8
Total	25	29.802536	2.4035772	8	
	50	36.460313	1.7657335	8	
	Total	33.131424	3.9964066	16	
TxD	150	25	29.953956	4.2528839	4
		50	43.505089	1.1760230	4
		Total	36.729523	7.7981370	8
	170	25	34.029163	2.7064929	4
		50	46.187660	2.9225898	4
		Total	40.108412	7.0026323	8
Total	25	31.991560	3.9542202	8	
	50	44.846375	2.5118592	8	
	Total	38.418967	7.3693154	16	

TxD

Tratamento		N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Tukey B ^a	150-25	4	29.953956	
	170-25	4	34.029163	

	150-50	4		43.505089
	170-50	4		46.187660

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 4,000.

TxC

Tratamento		N	Subset for alpha = 0.05			
			1	2	3	4
Tukey B ^a	150-25	4	28.104342	31.500729	35.045889	37.874737
	170-25	4				
	150-50	4				
	170-50	4				

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 4,000.

PM

Tratamento		N	Subset for alpha = 0.05		
			1	2	3
Tukey B ^a	150-25	4	6.630982691	8.219123	9.205254
	170-25	4	6.793983196		
	150-50	4			
	170-50	4			

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 4,000.

Tests of Between-Subjects Effects

Source		Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	PM	17,993 ^a	3	5,998	34,772	,000
	txc	216,380 ^b	3	72,127	37,324	,000
	txd	708,592 ^c	3	236,197	26,737	,000
Intercept	PM	951,682	1	951,682	5517,388	,000
	txc	17563,060	1	17563,060	9088,524	,000

Temperatura	txd	23616,273	1	23616,273	2673,287	,000
	PM	15,995	1	15,995	92,733	,000
	txc	38,754	1	38,754	20,054	,001
Pressão	txd	45,668	1	45,668	5,169	,042
	PM	1,321	1	1,321	7,656	,017
	txc	177,304	1	177,304	91,751	,000
Temperatura * Pressão	txd	660,985	1	660,985	74,821	,000
	PM	,678	1	,678	3,928	,071
	txc	,322	1	,322	,167	,690
Error	txd	1,939	1	1,939	,220	,648
	PM	2,070	12	,172		
	txc	23,189	12	1,932		
Total	txd	106,010	12	8,834		
	PM	971,745	16			
	txc	17802,629	16			
Corrected Total	txd	24430,875	16			
	PM	20,063	15			
	txc	239,569	15			
	txd	814,602	15			

a. R Squared = ,897 (Adjusted R Squared = ,871)

b. R Squared = ,903 (Adjusted R Squared = ,879)

c. R Squared = ,870 (Adjusted R Squared = ,837)

APÊNDICE 2 – PROPRIEDADES FÍSICAS

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Min.	Max.	
					Lower Bound	Upper Bound			
I2	150-25	15	12,0279	,73744	,19041	11,6195	12,4363	11,04	13,34
	150-50	14	13,7274	1,41678	,37865	12,9094	14,5454	11,69	17,31
	170-25	16	11,5421	1,69256	,42314	10,6402	12,4440	9,28	14,52
	170-50	15	10,7986	1,69985	,43890	9,8572	11,7399	8,29	13,67
	"Testemunha"	16	4,9248	,59524	,14881	4,6076	5,2420	4,12	6,30
	Total	76	10,5007	3,30521	,37913	9,7454	11,2560	4,12	17,31
I4	150-25	14	18,7939	,65173	,17418	18,4176	19,1702	18,11	20,41

	150-50	15	22,0844	2,59482	,66998	20,6475	23,5214	18,76	28,11
	170-25	16	17,5268	2,49779	,62445	16,1958	18,8578	13,50	22,36
	170-50	16	16,5234	3,18285	,79571	14,8274	18,2194	12,48	22,36
	"Testemunha"	16	8,3204	,72830	,18207	7,9323	8,7085	7,01	9,80
	Total	77	16,5235	5,10685	,58198	15,3644	17,6826	7,01	28,11
I8	150-25	15	26,9935	1,17358	,30302	26,3436	27,6434	25,23	29,56
	150-50	14	31,2771	2,48131	,66316	29,8444	32,7097	27,22	36,73
	170-25	16	25,2860	3,27624	,81906	23,5402	27,0317	19,91	29,99
	170-50	16	23,4634	5,82297	1,45574	20,3605	26,5662	16,92	34,06
	"Testemunha"	16	12,8900	,75310	,18828	12,4887	13,2913	11,73	14,65
	Total	77	23,7534	6,93442	,79025	22,1795	25,3273	11,73	36,73
I16	150-25	15	38,6863	1,67782	,43321	37,7572	39,6155	35,81	41,71
	150-50	14	45,4746	4,35449	1,16379	42,9604	47,9889	39,83	54,82
	170-25	16	36,8385	6,34914	1,58728	33,4553	40,2217	26,66	46,60
	170-50	16	29,3839	9,77337	2,44334	24,1760	34,5917	7,08	45,04
	"Testemunha"	13	18,5227	,39335	,10909	18,2850	18,7604	17,68	19,09
	Total	74	34,0175	10,52194	1,22315	31,5797	36,4552	7,08	54,82
I24	150-25	15	46,4195	2,48946	,64278	45,0409	47,7981	42,55	51,08
	150-50	16	57,0912	5,01165	1,25291	54,4206	59,7617	48,99	66,66
	170-25	16	43,5428	6,98055	1,74514	39,8231	47,2625	32,23	53,53
	170-50	16	36,4619	9,97188	2,49297	31,1483	41,7756	26,35	57,25
	"Testemunha"	15	23,4305	,56428	,14570	23,1180	23,7430	22,47	24,38
	Total	78	41,5549	12,64556	1,43183	38,7038	44,4061	22,47	66,66
I48	150-25	15	63,7883	2,71585	,70123	62,2843	65,2923	59,52	68,51
	150-50	16	78,2891	6,11123	1,52781	75,0326	81,5455	67,44	88,67
	170-25	16	56,8651	10,25284	2,56321	51,4017	62,3284	41,05	73,50
	170-50	16	45,0211	12,59378	3,14845	38,3103	51,7318	31,55	69,02
	"Testemunha"	14	32,5404	,79172	,21160	32,0833	32,9975	31,25	34,10
	Total	77	55,7817	17,44465	1,98800	51,8223	59,7412	31,25	88,67
I72	150-25	15	74,0737	3,56777	,92119	72,0979	76,0495	68,22	80,54
	150-50	16	88,9572	6,46291	1,61573	85,5134	92,4010	76,55	98,77
	170-25	16	63,8123	12,40352	3,10088	57,2029	70,4216	45,33	83,82
	170-50	16	49,5078	14,24327	3,56082	41,9181	57,0975	34,04	78,05
	"Testemunha"	16	37,3170	1,06532	,26633	36,7494	37,8847	35,32	39,41
	Total	79	62,5901	20,33567	2,28794	58,0351	67,1450	34,04	98,77
ABS2	150-25	15	6,8857	,66623	,17202	6,5168	7,2547	5,84	8,08
	150-50	15	6,4191	1,15485	,29818	5,7796	7,0586	3,68	8,43
	170-25	16	6,3040	1,19597	,29899	5,6668	6,9413	4,71	8,70
	170-50	16	4,7744	1,00892	,25223	4,2367	5,3120	3,41	7,00
	"Testemunha"	16	13,2213	3,05838	,76460	11,5916	14,8510	9,46	18,83
	Total	78	7,5432	3,40060	,38504	6,7765	8,3099	3,41	18,83
ABS4	150-25	14	12,0997	1,56068	,41711	11,1986	13,0008	10,55	16,32
	150-50	16	11,4018	1,69620	,42405	10,4979	12,3056	9,24	15,31
	170-25	16	10,1873	1,87044	,46761	9,1906	11,1840	7,74	13,69
	170-50	16	7,6637	1,85919	,46480	6,6730	8,6544	5,79	12,24

	"Testemunha"	16	20,4825	3,34590	,83648	18,6996	22,2654	15,99	26,31
	Total	78	12,3738	4,89727	,55451	11,2697	13,4780	5,79	26,31
ABS8	150-25	16	20,2844	1,35866	,33966	19,5605	21,0084	17,17	22,25
	150-50	16	19,8936	2,24916	,56229	18,6951	21,0921	16,35	24,05
	170-25	16	18,0365	2,95769	,73942	16,4605	19,6125	13,94	23,19
	170-50	16	13,2423	3,95483	,98871	11,1349	15,3497	9,12	21,03
	"Testemunha"	16	29,9635	3,78083	,94521	27,9489	31,9782	25,10	36,67
	Total	80	20,2841	6,22321	,69578	18,8992	21,6690	9,12	36,67
ABS16	150-25	16	36,8402	1,23264	,30816	36,1834	37,4971	33,48	39,31
	150-50	16	37,5720	3,96342	,99085	35,4600	39,6839	31,65	44,29
	170-25	16	34,8074	6,21580	1,55395	31,4953	38,1196	25,46	44,41
	170-50	16	22,2891	7,02730	1,75683	18,5445	26,0337	15,36	35,80
	"Testemunha"	16	47,1242	2,25639	,56410	45,9218	48,3265	43,90	51,34
	Total	80	35,7266	9,21642	1,03043	33,6756	37,7776	15,36	51,34
ABS24	150-25	16	51,7300	1,18915	,29729	51,0963	52,3636	49,18	53,63
	150-50	16	52,6421	5,21407	1,30352	49,8637	55,4205	43,20	60,35
	170-25	16	44,8074	8,70819	2,17705	40,1672	49,4477	31,65	58,97
	170-50	16	25,6706	9,11734	2,27933	20,8124	30,5289	14,03	45,29
	"Testemunha"	15	58,9650	1,67675	,43294	58,0365	59,8936	56,03	62,34
	Total	79	46,6086	13,01447	1,46424	43,6935	49,5237	14,03	62,34
ABS48	150-25	16	74,7343	3,12941	,78235	73,0668	76,4019	69,30	79,41
	150-50	16	80,9847	7,31019	1,82755	77,0894	84,8800	64,89	92,46
	170-25	16	59,2713	14,54439	3,63610	51,5212	67,0215	40,14	92,08
	170-50	16	38,0412	15,50432	3,87608	29,7796	46,3029	22,84	68,14
	"Testemunha"	15	73,6475	1,86987	,48280	72,6120	74,6830	70,22	76,74
	Total	79	65,2306	18,48477	2,07970	61,0902	69,3710	22,84	92,46
ABS72	150-25	16	90,5152	4,26381	1,06595	88,2432	92,7873	82,54	96,10
	150-50	16	94,0512	8,90641	2,22660	89,3053	98,7971	77,68	109,81
	170-25	16	65,3685	14,14404	3,53601	57,8316	72,9053	45,05	88,25
	170-50	16	40,8877	15,89272	3,97318	32,4190	49,3563	26,13	75,44
	"Testemunha"	15	81,9003	2,20309	,56883	80,6803	83,1204	78,73	85,82
	Total	79	74,4515	22,29518	2,50840	69,4576	79,4453	26,13	109,81
TNRE	150-25	16	57,2984	7,87028	1,96757	53,1046	61,4922	46,39	75,82
	150-50	16	79,3595	23,13366	5,78342	67,0324	91,6865	43,86	108,92
	170-25	16	36,1408	16,27092	4,06773	27,4706	44,8109	16,90	71,67
	170-50	16	17,8318	10,49723	2,62431	12,2382	23,4254	6,86	41,02
	"Testemunha"	16	11,5194	1,95378	,48845	10,4783	12,5605	9,16	15,81
	Total	80	40,4300	28,74528	3,21382	34,0330	46,8269	6,86	108,92
TUE	150-25	15	9,0701	,16456	,04249	8,9790	9,1613	8,73	9,32
	150-50	15	9,2264	,23452	,06055	9,0965	9,3562	8,92	9,65
	170-25	15	8,6194	,43471	,11224	8,3787	8,8602	7,82	9,45
	170-50	15	7,9944	,40913	,10564	7,7678	8,2209	7,57	8,87
	"Testemunha"	15	8,8851	,12590	,03251	8,8154	8,9548	8,63	9,10
	Total	75	8,7591	,52490	,06061	8,6383	8,8798	7,57	9,65

Multiple Comparisons

Dependent Variable				Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
							Lower Bound	Upper Bound
I2	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25	"Testemunha"	7,10314*	,47198	0,000	5,9223	8,2840
		150-50	"Testemunha"	8,80261*	,48060	0,000	7,6002	10,0050
		170-25	"Testemunha"	6,61732*	,46430	0,000	5,4557	7,7789
		170-50	"Testemunha"	5,87380*	,47198	0,000	4,6930	7,0546
I4	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25	"Testemunha"	10,47355*	,81065	,000	8,4468	12,5003
		150-50	"Testemunha"	13,76405*	,79611	,000	11,7737	15,7544
		170-25	"Testemunha"	9,20638*	,78316	,000	7,2484	11,1644
		170-50	"Testemunha"	8,20299*	,78316	,000	6,2450	10,1610
I8	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25	"Testemunha"	14,10354*	1,18098	,000	11,1509	17,0561
		150-50	"Testemunha"	18,38712*	1,20255	,000	15,3806	21,3937
		170-25	"Testemunha"	12,39600*	1,16178	,000	9,4914	15,3006
		170-50	"Testemunha"	10,57343*	1,16178	,000	7,6688	13,4780
I16	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25	"Testemunha"	20,16361*	2,19973	,000	14,6884	25,6388
		150-50	"Testemunha"	26,95195*	2,23591	,000	21,3867	32,5172
		170-25	"Testemunha"	18,31577*	2,16758	,000	12,9206	23,7109
		170-50	"Testemunha"	10,86117*	2,16758	,000	5,4660	16,2563
I24	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25	"Testemunha"	22,98896*	2,21678	,000	17,4620	28,5159
		150-50	"Testemunha"	33,66064*	2,18186	,000	28,2207	39,1006
		170-25	"Testemunha"	20,11226*	2,18186	,000	14,6723	25,5522
		170-50	"Testemunha"	13,03138*	2,18186	,000	7,5915	18,4713
I48	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25	"Testemunha"	31,24787*	2,97917	,000	23,8314	38,6643
		150-50	"Testemunha"	45,74868*	2,93388	,000	38,4450	53,0524
		170-25	"Testemunha"	24,32464*	2,93388	,000	17,0210	31,6283
		170-50	"Testemunha"	12,48069*	2,93388	,000	5,1770	19,7844
I72	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25	"Testemunha"	36,75665*	3,28240	,000	28,5619	44,9514
		150-50	"Testemunha"	51,64016*	3,22902	,000	43,5787	59,7016
		170-25	"Testemunha"	26,49521*	3,22902	,000	18,4337	34,5567
		170-50	"Testemunha"	12,19079*	3,22902	,001	4,1293	20,2523
ABS 2	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25	"Testemunha"	-6,33554*	,59772	,000	-7,8288	-4,8422
		150-50	"Testemunha"	-6,80219*	,59772	,000	-8,2955	-5,3089
		170-25	"Testemunha"	-6,91724*	,58800	,000	-8,3863	-5,4482
		170-50	"Testemunha"	-8,44693*	,58800	,000	-9,9159	-6,9779
ABS 4	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25	"Testemunha"	-8,38276*	,79797	,000	-10,3764	-6,3891
		150-50	"Testemunha"	-9,08070*	,77091	,000	-11,0067	-7,1547
		170-25	"Testemunha"	-	,77091	,000	-12,2212	-8,3691
		170-50	"Testemunha"	-	,77091	,000	-14,7448	-
ABS 8	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25	"Testemunha"	-9,67911*	1,06757	,000	-12,3425	-7,0157
		150-50	"Testemunha"	-	1,06757	,000	-12,7334	-7,4066
		170-25	"Testemunha"	-	1,06757	,000	-14,5905	-9,2636

				11,92705*				
		170-50	"Testemunha"	-	1,06757	,000	-19,3846	-
		150-25	"Testemunha"	16,72122*	1,66086	,000	-14,4275	14,0578
		150-50	"Testemunha"	10,28395*	1,66086	,000	-13,6958	-6,1404
ABS	Dunnett t	150-50	"Testemunha"	-9,55223*	1,66086	,000	-13,6958	-5,4086
16	(2-sided) ^a	170-25	"Testemunha"	-	1,66086	,000	-16,4604	-8,1732
		170-50	"Testemunha"	12,31676*	1,66086	,000	-28,9787	-
		150-25	"Testemunha"	24,83506*	2,23147	,006	-12,7946	20,6915
		150-50	"Testemunha"	-7,23503*	2,23147	,021	-11,8825	-1,6754
ABS	Dunnett t	170-25	"Testemunha"	-6,32293*	2,23147	,000	-19,7172	-,7633
24	(2-sided) ^a	170-50	"Testemunha"	-	2,23147	,000	-38,8540	-8,5980
		1	"Testemunha"	33,29439*	3,68422	,995	-8,0922	-
		2	"Testemunha"	1,08685	3,68422	,153	-1,8418	27,7348
ABS	Dunnett t	3	"Testemunha"	7,33723	3,68422	,001	-23,5552	10,2659
48	(2-sided) ^a	4	"Testemunha"	-	3,68422	,000	-44,7853	-5,1971
		150-25	"Testemunha"	35,60626*	3,81084	,086	-,8796	-
		150-50	"Testemunha"	8,61490	3,81084	,008	2,6563	26,4272
ABS	Dunnett t	170-25	"Testemunha"	12,15086*	3,81084	,000	-26,0264	18,1094
72	(2-sided) ^a	170-50	"Testemunha"	-	3,81084	,000	-50,5072	21,6454
		150-25	"Testemunha"	45,77897*	4,93928	,000	33,4562	-7,0373
		150-50	"Testemunha"	67,84005*	4,93928	,000	55,5173	-
TNR	Dunnett t	170-25	"Testemunha"	24,62136*	4,93928	,000	12,2986	31,5181
E	(2-sided) ^a	170-50	"Testemunha"	6,31239	4,93928	,517	-6,0103	58,1017
		1	"Testemunha"	,18502	,11007	,278	-,0900	80,1628
		2	"Testemunha"	,34125*	,11007	,010	,0662	36,9441
TUE	Dunnett t	3	"Testemunha"	-,26565	,11007	,061	-,5407	18,6351
	(2-sided) ^a	4	"Testemunha"	-,89073*	,11007	,000	-1,1657	-,4600
								,6163
								,0094
								-,6157

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

a. Dunnett t-tests treat one group as a control, and compare all other groups against it.

Tests of Between-Subjects Effects

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
I2	52,850 ^a	3	17,617	9,349	,000
I4	179,592 ^b	3	59,864	10,777	,000
Corrected Model	426,140 ^c	3	142,047	10,116	,000
I16	1711,996 ^d	3	570,665	13,826	,000
I24	2458,717 ^e	3	819,572	17,522	,000
I48	6933,901 ^f	3	2311,300	28,061	,000

	I72	10471,825 ^g	3	3490,608	30,748	,000
	ABS2	32,755 ^h	3	10,918	12,790	,000
	ABS4	155,727 ⁱ	3	51,909	18,489	,000
	ABS8	429,681 ^j	3	143,227	17,396	,000
	ABS16	2083,395 ^k	3	694,465	23,928	,000
	ABS24	6501,380 ^l	3	2167,127	41,858	,000
	ABS48	14333,933 ^m	3	4777,978	31,861	,000
	ABS72	24779,194 ⁿ	3	8259,731	55,050	,000
	TNRE	26081,676 ^o	3	8693,892	32,255	,000
	TUE	11,402 ^p	3	3,801	31,816	,000
Intercept	I2	7182,779	1	7182,779	3812,035	,000
	I4	17383,277	1	17383,277	3129,353	,000
	I8	35690,891	1	35690,891	2541,703	,000
	I16	69604,950	1	69604,950	1686,439	,000
	I24	103005,643	1	103005,643	2202,207	,000
	I48	182638,406	1	182638,406	2217,397	,000
	I72	235610,335	1	235610,335	2075,455	,000
	ABS2	1908,227	1	1908,227	2235,297	,000
	ABS4	5418,751	1	5418,751	1930,041	,000
	ABS8	16157,020	1	16157,020	1962,431	,000
	ABS16	53888,085	1	53888,085	1856,753	,000
	ABS24	95422,845	1	95422,845	1843,084	,000
	ABS48	202202,038	1	202202,038	1348,349	,000
	ABS72	266712,655	1	266712,655	1777,618	,000
TNRE	111332,207	1	111332,207	413,051	,000	
TUE	3880,948	1	3880,948	32488,943	,000	
Temperatura	I2	29,298	1	29,298	15,549	,000
	I4	125,548	1	125,548	22,601	,000
	I8	273,584	1	273,584	19,483	,000
	I16	999,234	1	999,234	24,210	,000
	I24	1512,623	1	1512,623	32,339	,000
	I48	4799,976	1	4799,976	58,276	,000
	I72	7660,341	1	7660,341	67,479	,000
	ABS2	19,329	1	19,329	22,642	,000
	ABS4	111,826	1	111,826	39,830	,000
	ABS8	279,656	1	279,656	33,967	,000
	ABS16	993,139	1	993,139	34,219	,000
	ABS24	3911,798	1	3911,798	75,556	,000
	ABS48	11257,402	1	11257,402	75,068	,000
	ABS72	20850,648	1	20850,648	138,968	,000
TNRE	21653,632	1	21653,632	80,337	,000	
TUE	8,463	1	8,463	70,846	,000	
Pressão	I2	1,454	1	1,454	,771	,384
	I4	4,538	1	4,538	,817	,371
	I8	8,853	1	8,853	,630	,431

	I16	26,097	1	26,097	,632	,430
	I24	6,561	1	6,561	,140	,710
	I48	,010	1	,010	,000	,991
	I72	9,308	1	9,308	,082	,776
	ABS2	11,698	1	11,698	13,703	,001
	ABS4	42,754	1	42,754	15,228	,000
	ABS8	104,745	1	104,745	12,722	,001
	ABS16	498,639	1	498,639	17,181	,000
	ABS24	1228,803	1	1228,803	23,734	,000
	ABS48	1052,347	1	1052,347	7,017	,011
	ABS72	1941,931	1	1941,931	12,943	,001
	TNRE	1,032	1	1,032	,004	,951
	TUE	,846	1	,846	7,084	,011
Temperatura * Pressão	I2	22,320	1	22,320	11,846	,001
	I4	49,502	1	49,502	8,911	,004
	I8	143,910	1	143,910	10,248	,002
	I16	650,663	1	650,663	15,765	,000
	I24	924,284	1	924,284	19,761	,000
	I48	2070,299	1	2070,299	25,135	,000
	I72	2696,053	1	2696,053	23,749	,000
	ABS2	1,607	1	1,607	1,882	,176
	ABS4	2,909	1	2,909	1,036	,314
	ABS8	39,967	1	39,967	4,854	,032
	ABS16	506,469	1	506,469	17,451	,000
	ABS24	1188,548	1	1188,548	22,957	,000
	ABS48	1864,482	1	1864,482	12,433	,001
	ABS72	1890,111	1	1890,111	12,597	,001
TNRE	4244,800	1	4244,800	15,749	,000	
TUE	1,915	1	1,915	16,028	,000	
Error	I2	90,443	48	1,884		
	I4	266,636	48	5,555		
	I8	674,022	48	14,042		
	I16	1981,120	48	41,273		
	I24	2245,144	48	46,774		
	I48	3953,573	48	82,366		
	I72	5449,069	48	113,522		
	ABS2	40,977	48	,854		
	ABS4	134,764	48	2,808		
	ABS8	395,192	48	8,233		
	ABS16	1393,092	48	29,023		
	ABS24	2485,126	48	51,773		
	ABS48	7198,208	48	149,963		
	ABS72	7201,887	48	150,039		
TNRE	12937,734	48	269,536			
TUE	5,734	48	,119			

	I2	7358,516	52		
	I4	17819,377	52		
	I8	36776,985	52		
	I16	72928,007	52		
	I24	107113,670	52		
	I48	190905,315	52		
	I72	247171,046	52		
Total	ABS2	1970,316	52		
	ABS4	5619,857	52		
	ABS8	16793,515	52		
	ABS16	56880,157	52		
	ABS24	102190,933	52		
	ABS48	217240,411	52		
	ABS72	287232,698	52		
	TNRE	142440,871	52		
	TUE	3921,034	52		
	Corrected Total	I2	143,293	51	
I4		446,227	51		
I8		1100,161	51		
I16		3693,116	51		
I24		4703,861	51		
I48		10887,474	51		
I72		15920,893	51		
ABS2		73,732	51		
ABS4		290,491	51		
ABS8		824,873	51		
ABS16		3476,487	51		
ABS24		8986,506	51		
ABS48		21532,141	51		
ABS72		31981,082	51		
TNRE	39019,409	51			
TUE	17,135	51			

- a. R Squared = ,369 (Adjusted R Squared = ,329)
b. R Squared = ,402 (Adjusted R Squared = ,365)
c. R Squared = ,387 (Adjusted R Squared = ,349)
d. R Squared = ,464 (Adjusted R Squared = ,430)
e. R Squared = ,523 (Adjusted R Squared = ,493)
f. R Squared = ,637 (Adjusted R Squared = ,614)
g. R Squared = ,658 (Adjusted R Squared = ,636)
h. R Squared = ,444 (Adjusted R Squared = ,410)
i. R Squared = ,536 (Adjusted R Squared = ,507)
j. R Squared = ,521 (Adjusted R Squared = ,491)
k. R Squared = ,599 (Adjusted R Squared = ,574)
l. R Squared = ,723 (Adjusted R Squared = ,706)

m. R Squared = ,666 (Adjusted R Squared = ,645)

n. R Squared = ,775 (Adjusted R Squared = ,761)

o. R Squared = ,668 (Adjusted R Squared = ,648)

p. R Squared = ,665 (Adjusted R Squared = ,644)

APÊNDICE 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Min.	Max.	
					Lower Bound	Upper Bound			
MOR	150-25	33,3635	2,02057	,50514	32,2868	34,4401	29,87	36,64	
	150-50	44,3473	4,67051	1,16763	41,8586	46,8360	34,86	50,06	
	170-25	36,5154	3,82541	,95635	34,4769	38,5538	28,48	42,32	
	170-50	50,8522	5,86695	1,46674	47,7260	53,9785	40,53	58,17	
	"Testemunha"	16	26,9226	1,28822	,32205	26,2362	27,6090	24,64	28,43
	Total	80	38,4002	9,25477	1,03472	36,3406	40,4597	24,64	58,17
MOE	150-25	4852,3865	299,59152	74,89788	4692,7454	5012,0275	4263,18	5328,98	
	150-50	5840,9961	764,21788	191,05447	5433,7731	6248,2190	4646,37	7630,06	
	170-25	5176,3498	554,58927	138,64732	4880,8300	5471,8695	4464,53	6052,74	
	170-50	5700,5070	338,83688	84,70922	5519,9535	5881,0604	4992,50	6137,60	
	"Testemunha"	16	3798,9794	76,36230	19,09057	3758,2888	3839,6700	3710,79	3888,97
	Total	80	5073,8437	865,56393	96,77299	4881,2219	5266,4656	3710,79	7630,06
Dureza	150-25	11523,2888	746,27797	186,56949	11125,6253	11920,9522	10249,63	12684,83	
	150-50	15798,0598	1604,82761	401,20690	14942,9076	16653,2121	12146,48	17684,27	
	170-25	12265,8163	781,96347	195,49087	11849,1373	12682,4952	10714,20	13271,88	
	170-50	17159,7674	571,50721	142,87680	16855,2327	17464,3021	15656,02	17630,33	
	"Testemunha"	16	4518,9381	236,05592	59,01398	4393,1528	4644,7234	4165,08	4896,53
	Total	80	12253,1741	4519,67279	505,31478	11247,3702	13258,9780	4165,08	17684,27
Compressão	150-25	20,8912	3,95451	,98863	18,7840	22,9984	12,88	27,07	
	150-50	22,4230	2,99784	,74946	20,8256	24,0204	16,61	28,11	
	170-25	17,6161	2,79502	,69875	16,1268	19,1055	12,56	22,25	
	170-50	18,6890	2,34491	,65036	17,2720	20,1061	15,40	23,70	
	"Testemunha"	16	15,1792	1,49942	,37486	14,3803	15,9782	12,67	17,67

a"								
Total	77	18,9703	3,79814	,43284	18,1082	19,8323	12,56	28,11

Multiple Comparisons

Dependent Variable			Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
MOR	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25 "Testemunha"	6,44086*	1,38393	,000	2,9882	9,8936
		150-50 "Testemunha"	17,42472*	1,38393	,000	13,9720	20,8774
		170-25 "Testemunha"	9,59277*	1,38393	,000	6,1401	13,0455
		170-50 "Testemunha"	23,92965*	1,38393	,000	20,4770	27,3823
MOE	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25 "Testemunha"	1053,40704*	165,98154	,000	639,3092	1467,5049
		150-50 "Testemunha"	2042,01662*	165,98154	,000	1627,9188	2456,1145
		170-25 "Testemunha"	1377,37031*	165,98154	,000	963,2725	1791,4681
		170-50 "Testemunha"	1901,52753*	165,98154	,000	1487,4297	2315,6254
Dureza	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25 "Testemunha"	7004,35063*	321,17800	,000	6203,0621	7805,6392
		150-50 "Testemunha"	11279,12172*	321,17800	,000	10477,8332	12080,4103
		170-25 "Testemunha"	7746,87813*	321,17800	,000	6945,5896	8548,1667
		170-50 "Testemunha"	12640,82931*	321,17800	,000	11839,5408	13442,1179
Compressão	Dunnett t (2-sided) ^a	150-25 "Testemunha"	5,71199*	1,00887	,000	3,1895	8,2344
		150-50 "Testemunha"	7,24377*	1,00887	,000	4,7213	9,7662
		170-25 "Testemunha"	2,43689	1,00887	,061	-,0856	4,9593
		170-50 "Testemunha"	3,50980*	1,06549	,006	,8458	6,1738

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

a. Dunnett t-tests treat one group as a control, and compare all other groups against it.

Tests of Between-Subjects Effects

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
Corrected Model	MOR	2354,585 ^a	3	784,862	45,136	,000
	MOE	9405571,401 ^b	3	3135190,467	11,057	,000
	Dureza	322055326,595 ^c	3	107351775,532	100,917	,000
	Compressão	219,835 ^d	3	73,278	7,559	,000
Intercept	MOR	101354,297	1	101354,297	5828,718	,000
	MOE	1750260258,458	1	1750260258,458	6172,923	,000
	Dureza	12148219908,835	1	12148219908,835	11420,015	,000
	Compressão	23973,887	1	23973,887	2473,131	,000
Temperatura	MOR	259,701	1	259,701	14,935	,000
	MOE	60264,987	1	60264,987	,213	,647

	Dureza	15648914,670	1	15648914,670	14,711	,000
	Compressão	185,789	1	185,789	19,166	,000
Pressão	MOR	2169,384	1	2169,384	124,758	,000
	MOE	8012018,997	1	8012018,997	28,257	,000
	Dureza	313081411,013	1	313081411,013	294,314	,000
	Compressão	25,657	1	25,657	2,647	,109
Temperatura * Pressão	MOR	14,871	1	14,871	,855	,359
	MOE	1029264,665	1	1029264,665	3,630	,062
	Dureza	1140409,750	1	1140409,750	1,072	,305
	Compressão	,796	1	,796	,082	,775
Error	MOR	991,161	57	17,389		
	MOE	16161685,412	57	283538,341		
	Dureza	60634643,904	57	1063765,683		
	Compressão	552,543	57	9,694		
Total	MOR	103432,312	61			
	MOE	1781485697,268	61			
	Dureza	12382439171,890	61			
	Compressão	25086,187	61			
Corrected Total	MOR	3345,745	60			
	MOE	25567256,813	60			
	Dureza	382689970,499	60			
	Compressão	772,378	60			

a. R Squared = ,704 (Adjusted R Squared = ,688)

b. R Squared = ,368 (Adjusted R Squared = ,335)

c. R Squared = ,842 (Adjusted R Squared = ,833)

d. R Squared = ,285 (Adjusted R Squared = ,247)