



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

LARISSA MESQUITA DO VALE

**EFEITO DO TRATAMENTO TERMOMECÂNICO SOBRE AS PROPRIEDADES DE
PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDP)**

Brasília
2016



Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

LARISSA MESQUITA DO VALE

**EFEITO DO TRATAMENTO TERMOMECÂNICO SOBRE AS PROPRIEDADES DE
PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDP)**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Florestal da Universidade de
Brasília como requisito para obtenção do
título de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Henrique
Soares Del Menezzi

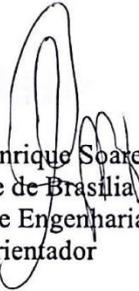
Brasília
2016



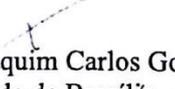
Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Florestal

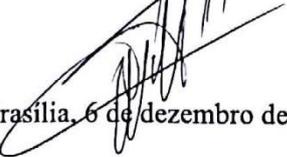
EFEITO DO TRATAMENTO TERMOMECÂNICO SOBRE AS PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE PARTÍCULAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDP)

Estudante: Larissa Mesquita do Vale
Matrícula: 09/0120701
Orientador: Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi
Menção: SS


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


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


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


Brasília, 6 de dezembro de 2016

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Tarcísio e Maria Luiza, e minha irmã, Tarcianne, pelo grande apoio durante toda a graduação.

Aos meus amigos, em especial Amanda Silva, Eduardo Pedra, Jaqueline Bosco e Leandro Reinaldo, pela ajuda e apoio.

Às colegas Priscila Santos e Mariana Neves pela colaboração durante a realização do trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi, pela paciência, contribuição e incentivo ao estudo.

A todos os professores e colegas de curso que de alguma forma contribuíram para a minha formação acadêmica.

Aos funcionários do Laboratório de Produtos Florestais (LPF) e do Departamento de Engenharia Florestal, sem os quais não seria possível a conclusão desse trabalho.

Por fim, a Deus pela força para concluir esta etapa.

RESUMO

Os painéis de madeira aglomerada, hoje conhecidos como MDP (*medium density particleboard*), são painéis de madeira reconstituída, cujas propriedades estão relacionadas diretamente às variáveis do processo de prensagem, como tempo, temperatura, pressão e teor de adesivo, que interferem nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis. O tratamento termomecânico combina o tratamento térmico com a ação da pressão, aumentando a densidade do painel e tem como objetivo melhorar algumas propriedades físicas e mecânicas. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo a avaliação do efeito do tratamento termomecânico sobre as propriedades de painéis MDP. O tratamento foi realizado utilizando-se uma prensa hidráulica, onde foram avaliados quatro tratamentos decorrentes da combinação de duas temperaturas (150 e 170°C) e duas pressões (25 e 50% da resistência à compressão perpendicular ao plano do painel) comparados à testemunha. As análises estatísticas realizadas pelo programa SPSS 20.0 foram o teste de Tukey B, teste de médias de Dunnett e Análise de Variância Fatorial. Houve um aumento na densidade do painel, evidenciado pelo aumento da taxa de densificação e taxa de compactação, e um aumento na perda de massa do painel. Os resultados dos ensaios mecânicos foram positivos apenas para a dureza superficial, que apresentou ganho significativo em todos os tratamentos, sendo o de menor temperatura (150°C) e maior pressão (50%) o mais eficiente, e para o módulo de elasticidade dinâmico, onde o tratamento de maior temperatura (170°C) e maior pressão (50%) foi o mais eficiente. As propriedades módulo de ruptura em flexão estática, módulo de elasticidade em flexão estática e compressão paralela ao plano do painel apresentaram reduções em todos os tratamentos. As propriedades físicas, de modo geral, apresentaram reduções demonstrando uma perda na estabilidade dimensional. O tratamento termomecânico, de modo geral, reduziu as propriedades físicas e mecânicas do painel, apresentando melhora apenas para a dureza superficial e para o módulo de elasticidade dinâmico.

Palavras-chave: tratamento termomecânico, aglomerado, MDP, propriedades físicas, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Particleboard panels, today known as MDP (medium density particleboard), are panels of reconstituted wood, whose properties are directly related to the variables of the pressing process, such as time, temperature, pressure and level of adhesive, which interfere in the physical and mechanical properties of the panels. The thermomechanical treatment combines the thermal treatment with the action of pressure, increasing the density of the panel and aims to improve some physical and mechanical properties. Accordingly, the present study aimed to assess the effect of the thermomechanical treatment on the physical and mechanical properties of MDP panels. The treatment was performed using a hydraulic press and four treatments were assessed resulted from the combination of two temperatures (150 and 170°C) and two pressures (25 and 50% of the resistance to compression perpendicular to the plane of the panel) compared to the control. The statistical analysis made by the program SPSS 20.0 were Tukey B, test of the Dunnett average and factor variance. There was an increase in the density of the panel, evidenced by the increase in the densification rate and compression rate, and an increase in the loss of mass of the panel. The results of mechanical tests were positive only for the property surface hardness, which presented significant gain in all treatments, with the lowest temperature (150°C) and greater pressure (50%) the most efficient, and for the dynamic elastic modulus, where the treatment of higher temperature (170°C) and greater pressure (50%) was the most eficiente. The properties modulus of rupture in static bending, modulus of elasticity in static bending and compression parallel to the plane of the panel showed reduction in all treatments. The physical properties, in general, showed reductions, proving a loss on the dimensional stability. The thermomechanical treatment, in general, reduced the physical and mechanical properties of the panel, showing improvement only for surface hardness and dynamic elastic modulus.

Keywords: thermomechanical treatment, Particleboard, MDP, physical properties, mechanical properties.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| RESUMO | |
| ABSTRACT | |
| LISTA DE FIGURAS | |
| LISTA DE TABELAS | |
| LISTA DE SIGLAS | |
| LISTA DE EQUAÇÕES | |
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 12 |
| 3. REVISÃO DE LITERATURA..... | 13 |
| 3.1. MDP (<i>medium density particleboard</i>)..... | 13 |
| 3.2. Propriedades da madeira..... | 14 |
| 3.2.1. Propriedades físicas e mecânicas dos painéis | 15 |
| 3.3. Tratamento termomecânico | 17 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 19 |
| 4.1. Ensaio de compressão perpendicular ao plano do painel ($f_{c,90^\circ}$)..... | 19 |
| 4.2. Tratamento termomecânico | 20 |
| 4.3. Caracterização do tratamento termomecânico..... | 22 |
| 4.4. Caracterização das propriedades físicas e mecânicas..... | 23 |
| 4.4.1. Densidade aparente | 24 |
| 4.4.2. Ensaio de imersão..... | 24 |
| 4.4.3. Ensaio de ondas de tensão | 26 |
| 4.4.4. Ensaio de flexão estática | 27 |
| 4.4.5. Ensaio de dureza superficial (f_H)..... | 29 |
| 4.4.6 Ensaio de compressão paralela ao plano do painel ($f_{c,0^\circ}$) | 29 |
| 4.5. Análise de dados | 30 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 30 |
| 5.1. Tratamento termomecânico | 30 |
| 5.2. Propriedades Mecânicas | 35 |
| 5.3. Propriedades físicas | 40 |
| 6. CONCLUSÃO | 43 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 44 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Prensa hidráulica utilizada nos tratamentos termomecânicos..... | 20 |
| Figura 2. Esquema geral do tratamento termomecânico. | 22 |
| Figura 3. a) Ensaio de flexão estática. b) Ensaio de dureza superficial. c) Ensaio de compressão paralela ao plano do painel. | 23 |
| Figura 4. a) Balança eletrônica. b) Relógio comparador digital. | 25 |
| Figura 5. <i>Stress Wave Timer</i> | 27 |
| Figura 6. Variação da temperatura interna dos painéis. | 31 |
| Figura 7. Ilustração das espessuras da amostra não tratada (NT) e dos quatro tratamentos (T1, T2, T3 e T4). | 32 |
| Figura 8. Taxa de densificação (TXD). Análise estatística pelo teste de Tukey B ao nível de 5% de significância, onde letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes.. | 32 |
| Figura 9. Taxa de compactação (TXC). Análise estatística pelo teste de Tukey B ao nível de 5% de significância, onde letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes.. | 33 |
| Figura 10. Perda de massa (PM). Análise estatística pelo teste de Tukey B ao nível de 5% de significância, onde letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes. | 34 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Descrição dos tratamentos termomecânicos..... | 21 |
| Tabela 2. Dimensões e vãos dos corpos-de-prova do ensaio de flexão. | 28 |
| Tabela 3. Dimensões dos CPs do ensaio de compressão paralela ao plano do painel. | 29 |
| Tabela 4. Análise fatorial das variáveis TXD, TXC e PM do tratamento termomecânico. | 35 |
| Tabela 5. Valores médios do teste de Dunnett para as propriedades mecânicas. | 36 |
| Tabela 6. Análise fatorial das propriedades mecânicas..... | 37 |
| Tabela 7. Valores médios do teste t-pareado para o ensaio não destrutivo de ondas de tensão realizado com o <i>Stress Wave</i> | 39 |
| Tabela 8. Valores médios do teste de Dunnett para as propriedades físicas..... | 40 |
| Tabela 9. Análise fatorial das propriedades físicas. | 42 |

LISTA DE SIGLAS

ABS – absorção

CP - Corpo-de-prova

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_m - módulo de ruptura em flexão estática

IE - inchamento em espessura

MDF - *medium density fiberboard*

MDP – *medium density particleboard*

OSB - *oriented strand board*

p - densidade

PM – perda de massa

P_M - pressão no manômetro da prensa

TNRE - taxa de não retorno em espessura

TUE - teor de umidade de equilíbrio

TXC - taxa de compactação

TXD – Taxa de densificação

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|---|----|
| (1) Resistência à compressão perpendicular ao plano do painel ($f_{c,90^\circ}$)..... | 19 |
| (2) Pressão no manômetro da prensa..... | 20 |
| (3) Taxa de compactação (TXC)..... | 22 |
| (4) Taxa de densificação (TXD)..... | 22 |
| (5) Perda de massa (PM)..... | 23 |
| (6) Densidade aparente (ρ)..... | 24 |
| (7) Inchamento em espessura (IE)..... | 25 |
| (8) Absorção (ABS)..... | 25 |
| (9) Taxa de não retorno em espessura (TNRE)..... | 26 |
| (10) Teor de umidade de equilíbrio (TUE)..... | 26 |
| (11) Módulo de elasticidade dinâmico (E_d)..... | 27 |
| (12) Módulo de ruptura em flexão estática (f_m)..... | 28 |
| (13) Módulo de elasticidade em flexão estática (E_M)..... | 28 |
| (14) Resistência à compressão paralela ao plano do painel ($f_{c,0^\circ}$)..... | 29 |

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um material com potencial para diversos usos como geração de energia, celulose, construções civis, construções rurais, móveis, entre outros. Por ser um material heterogêneo, apresenta variações químicas, físicas e anatômicas entre espécies, dentro de uma mesma espécie e dentro de um mesmo indivíduo. Nesse sentido, a determinação das suas propriedades físicas e mecânicas é de grande importância na escolha do uso final.

A madeira maciça pode apresentar limitações quanto ao seu uso, pois apresenta dimensões limitadas e diversos tipos de defeitos. O uso de painéis de madeira é uma importante alternativa a essas limitações, além de ser uma opção com relação ao aproveitamento de resíduos.

Os painéis de madeira são produzidos a partir de madeiras em diferentes estágios de desagregação e colados com adesivos específicos de acordo com o seu uso final, o qual é escolhido principalmente com relação a sua resistência a altas temperaturas e a umidade.

Os painéis de madeira aglomerada, hoje conhecidos como MDP (*medium density particleboard*), são conhecidos por apresentarem qualidade inferior em relação aos outros painéis. O estudo de tratamentos aplicados a esse tipo de material pode gerar informações importantes a respeito da melhoria das suas propriedades físicas e mecânicas, bem como na sua estabilidade dimensional. Além disso, é uma alternativa para substituir tratamentos que utilizam produtos químicos tóxicos, aumentar a competitividade deste material

O tratamento termomecânico utiliza a temperatura e a pressão como principais fatores na melhoria das propriedades de painéis de madeira. A maioria dos estudos sobre esse tipo de tratamento está voltado para painéis OSB (*oriented strand board*), o que mostra a carência de estudos com outros tipos de painéis, como por exemplo MDF (*medium density fiberboard*) e MDP.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o efeito do tratamento termomecânico (densificação) pós-produção, sobre as propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados de partículas (MDP). E de modo específico, avaliar o efeito da pressão (25 e 50% da resistência à compressão perpendicular ao plano do painel) e da temperatura (150 e 170°C), destacando-se as perdas e ganhos nas propriedades.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. MDP (*medium density particleboard*)

Os painéis de madeira aglomerada surgiram na Alemanha, durante a Segunda Guerra Mundial, devido aos problemas de indisponibilidade de madeira de boa qualidade para a produção de painéis compensados. Resíduos de madeira passaram a ser utilizados na produção de aglomerados como alternativa para suprir a demanda por painéis aglomerados (IWAKIRI et al., 2005).

Na década de 1990, mudanças na produção desses painéis foram marcadas pela substituição das prensas de prato ou cíclicas por prensas contínuas. Essa substituição fez aumentar a produtividade e diminuir os custos de produção. Outro avanço foi a melhoria nas características de resistências dos painéis, resultando em um aumento do consumo deste material. Com o objetivo de dissociar este novo produto do aglomerado tradicional, estes painéis passaram a ser chamados de MDP ou painel de partículas de média densidade (MATTOS et al., 2008).

O MDP é um painel de madeira reconstituída, cujas partículas são dispostas de forma diferenciada, com as maiores ao centro e as mais finas nas superfícies externas, formando três camadas. Estas partículas são aglutinadas e compactadas entre si através da ação conjunta de temperatura e pressão em prensa contínua, e com o uso de diferentes tipos de adesivos. O MDP é resultado da evolução da tecnologia de prensas contínuas e pertence a uma nova geração de painéis de partículas de média densidade (IBA, 2015).

As principais matérias-primas utilizadas no mundo são: resíduos industriais de madeira, resíduos da exploração florestal, madeiras de qualidade inferior, não industrializáveis de outra forma, madeiras provenientes de florestas plantadas, e reciclagem de madeiras sem serventia (MATTOS et al., 2008).

No Brasil, a madeira de florestas plantadas, principalmente eucalipto e pinus, constitui a principal fonte de matéria prima para a produção de painéis de aglomerado. O propósito inicial das primeiras indústrias desses painéis, no mundo, era o aproveitamento dos resíduos florestais (PIERRE et al., 2014).

A maioria dos processos tecnológicos utilizados pelas indústrias de produtos florestais possui rígidas exigências quanto à espécie, tamanho das partículas e qualidade da matéria-prima. (NAUMANN et al., 2008).

As matérias-primas utilizadas no processo de fabricação de painéis MDP são diversas, como resíduos industriais de madeira, resíduos da exploração florestal, madeiras de qualidade inferior que não são utilizadas para outros fins e madeiras provenientes de florestas plantadas. No Brasil, a principal fonte de matéria prima são as florestas plantadas de eucalipto e pinus (PIERRE et al., 2014).

Os parâmetros mais importantes no processamento de painéis de madeira, que podem ser controlados e influenciam na qualidade do produto final, são: teor de adesivo, tempo e temperatura de prensagem (SILVA et al., 2006).

O tempo de prensagem consiste no tempo decorrido entre a formação do colchão de partículas na espessura final desejada, até o momento de abertura dos pratos da prensa. Este tempo deve ser suficiente para que o centro do painel atinja a temperatura ideal de cura do adesivo e para a migração da umidade na forma de vapor pelas extremidades do painel (MENDES et al., 2006).

As principais etapas do processo produtivo de painéis MDP são: recebimento e estocagem da madeira, geração de partículas de madeira, secagem das partículas, classificação das partículas, cura do adesivo com as partículas para colagem, formação do colchão, prensagem a quente, corte do painel e acabamento (SILVA et al., 2013).

Os painéis são fabricados em diferentes espessuras e podem ser crus ou com revestimento. Os principais revestimentos utilizados nesses painéis são: os de baixa pressão (uma folha de papel especial é impregnada com resina e fundida ao painel pela ação de pressão e temperatura); revestimento finish foil (colagem de uma película de papel ao painel); e o revestimento de lâmina de madeira natural. (MATTOS et al., 2008).

3.2. Propriedades da madeira

A madeira e seus derivados são sólidos com estrutura capilar, capazes de absorver ou perder água para o meio em que se encontram. Como resultado, surgem as variações dimensionais e de constituição, as quais interferem significativamente nas suas propriedades físicas e mecânicas. Essa característica torna a madeira um material higroscópico, fazendo com que a mesma tenha constantes alterações no teor de umidade de equilíbrio em consonância com a umidade relativa do ambiente em que se encontra. Essa característica é explicada por sua constituição química, que é formada basicamente por polímeros de celulose, hemicelulose e lignina. Dentre estas, a hemicelulose é a mais hidrófila e, conseqüentemente, a que mais contribui para alterações dimensionais (MELO, 2013).

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas das madeiras é de grande importância na definição das aplicações a que são destinadas e no dimensionamento, com segurança, das partes componentes de uma estrutura com esse material. Os parâmetros dessas propriedades permitem que as madeiras sejam classificadas em usos a que se mostram mais apropriadas, como, por exemplo, peças estruturais, ambientes internos e externos de habitações, móveis, painéis e embalagens (ARAÚJO, 2007).

O mesmo autor cita ainda, que as principais propriedades físicas da madeira são a massa específica (ou densidade), expressa pelo quociente entre a massa e o volume, e a instabilidade dimensional, representada pela variação das dimensões (linear e volumétrica) em função do teor de umidade. As principais propriedades mecânicas são a resistência à ação de forças externas, tais como compressão, flexão, tração, cisalhamento e fendilhamento.

A mensuração das propriedades físicas e mecânicas é feita através de ensaios de laboratório, utilizando equipamentos próprios a essa finalidade e seguindo normas que especificam os métodos, procedimentos, fórmulas de cálculo, formas e dimensões dos corpos de prova (ARAÚJO, 2007). Esses ensaios normalmente são destrutivos, demorados e trabalhosos, além de exigir um número grande de amostras (MENDES et al., 2012).

3.2.1. Propriedades físicas e mecânicas dos painéis

As propriedades físicas de painéis MDP são obtidas através de ensaios físicos especificados por normas, sendo as principais propriedades a densidade, o teor de umidade, e o inchamento e absorção, que são influenciáveis entre si (SILVA et al., 2015).

Os painéis de madeira reconstituída geralmente apresentam alta absorção de água e inchamento em espessura. Esses problemas ocorrem devido ao principal adesivo utilizado, ureia-formaldeído, pois apresenta baixa resistência à umidade. Entretanto, propriedades como geometria das partículas, densidade e higroscopicidade da madeira também refletem significativamente na qualidade dos painéis (VITAL et al., 2014).

A massa específica final do painel não depende apenas da quantidade de partículas no colchão, mas também de variáveis de processamento da prensagem, tais como matéria prima (espécie), umidade das partículas, quantidade de aditivos (adesivo, parafina, preservantes) etc. Além da massa específica média do painel, a forma como esta se distribui verticalmente (gradiente vertical de densidade), também é influenciada por variáveis de processamento tais como o tempo de prensagem, tempo de fechamento da prensa e pressão durante a prensagem. (MELO e DEL MENEZZI, 2010).

Os mesmos autores citam que as dimensões da madeira e dos seus componentes aumentam conforme absorvem água, fenômeno chamado de inchamento, e ao liberar água, as dimensões diminuem, fenômeno chamado de retração. Essas variações dimensionais estão relacionadas a fatores como espécie, teor de umidade, direção estrutural (radial, tangencial ou longitudinal), posição dentro da árvore, massa específica, temperatura, grau de estresse de secagem causada pelo gradiente de umidade, entre outros.

A contração e o inchamento da madeira e seus derivados, juntamente com a anisotropia, são características indesejáveis da madeira, limitando seu uso ou exigindo técnicas específicas para sua utilização. Apesar do aumento da homogeneidade e dos limites dimensionais dos painéis de madeira em relação à madeira maciça, o painel aglomerado convencional tende a ampliar sua higroscopicidade, necessitando de aditivos para minimizar este efeito (MELO, 2013).

Por outro lado, as propriedades mecânicas estão divididas em propriedades de resistência e rigidez. Dentre as principais propriedades de resistência, estão a compressão paralela às fibras e o módulo de resistência a flexão na direção paralela as fibras. E, dentre as propriedades de rigidez, destacam-se os módulos de elasticidade longitudinal e transversal (ALMEIDA et al., 2013).

As propriedades mecânicas expressam o comportamento do material quando sujeitos a esforços externos e internos. Conhecer essas propriedades é de extrema importância na determinação de seus possíveis usos, principalmente na construção civil (BOTREL et al., 2007).

As avaliações destrutivas são os métodos mais utilizados no conhecimento das propriedades tecnológicas da madeira, apesar de ser onerosa devido ao tempo consumido na confecção dos corpos de prova e custo do material (STANGERLIN et al., 2011).

Segundo Hillig et al. (2002), de modo geral, todas as propriedades físico-mecânicas dos painéis são afetadas pela taxa de compactação. Taxas muito baixas de compactação não produzem um bom contato entre as partículas, o que prejudica a colagem e a resistência da chapa. Taxas muito altas de compactação causam problemas à liberação de água no momento da prensagem, além de produzirem painéis de alta densidade, o que pode deixá-lo muito pesado. A densidade do painel tem grande influência sobre a maioria das propriedades mecânicas do painel e o seu aumento geralmente causa o aumento da resistência à flexão e da resistência à tração.

Estudos realizados pelo mesmo autor mostraram que as variáveis módulo de ruptura (f_m) e módulo de elasticidade (E_M) possuem grande relação com a densidade. Ao se aumentar

a densidade do painel, aumenta-se o f_m e E_M . Uma maior compressão e uma maior densidade contribuem para a diminuição dos espaços vazios e da porosidade, resultando em uma melhor colagem, e conseqüentemente aumentando os valores de ligação interna (tração perpendicular à superfície do painel).

Em um estudo realizado por Protásio et al. (2012), observou-se alta correlação entre a densidade aparente do painel e o módulo de elasticidade, assim como entre a razão de compactação e o E_M . Concluiu-se, que quanto maior a densidade aparente, maior será o módulo de elasticidade, além de existir uma tendência à diminuição das propriedades de flexão com o aumento da densidade aparente. Quanto à ligação interna, os resultados mostraram que, quanto maior o valor de E_M e f_m , maiores são os valores de ligação interna e resistência à compressão dos painéis aglomerados de *Eucalyptus cloeziana*.

3.3. Tratamento termomecânico

Algumas propriedades dos painéis MDP estão diretamente relacionadas às variáveis do processo de prensagem, independentemente da origem da matéria-prima (floresta plantada ou aproveitamento de resíduos). Dentre essas variáveis, as principais são o tempo, a temperatura e a pressão de prensagem, aplicados durante a produção, que podem interferir nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis, e tem grande importância na classificação das chapas e no seu tipo de aplicação, bem como na seleção das matérias-primas ideais (SILVA et al., 2015).

Segundo o mesmo autor, o tempo é uma variável de grande importância, pois pode reduzir os custos de produção e o gasto de energia, podendo se obter semelhantes ou melhores resultados, com um processo racionalizado.

Com os resultados expressivos obtidos com a aplicação do tratamento térmico para a madeira maciça, algumas pesquisas relativamente recentes vêm sendo desenvolvidas sobre o tratamento térmico de painéis OSB, sob dois modos distintos: pós e pré-tratamento. O pré-tratamento é efetuado na matéria-prima dos painéis, ou seja, nas partículas, e o pós-tratamento é efetuado nos painéis, depois de consolidados e estabilizados (MENDES, 2013).

O tratamento térmico, também chamado de termorreificação, retificação térmica ou madeira termo tratada, é um processo de aplicação de aquecimento, com o objetivo de melhorar a qualidade e uso da madeira. As principais alterações nas propriedades são o aumento da estabilidade dimensional, o aumento da resistência ao ataque de organismos xilófagos e a diminuição da higroscopicidade. As propriedades mecânicas, porém, podem ser

afetadas de forma negativa, observando-se algumas discrepâncias entre os resultados de alguns autores, levando-se a acreditar que estas alterações variam de acordo com a espécie de madeira, além dos parâmetros usados no tratamento térmico (ARAÚJO et al., 2012).

Segundo Fiest e Sell (1987) o tratamento térmico a altas temperaturas (100 a 200°C) causa um aumento na estabilidade dimensional e uma significativa perda na dureza e resistência. Esta mudança ocorre devido à degradação da hemicelulose, que tem como função principal ligar os componentes de celulose e lignina dentro da parede celular e pode ter efeito de cola entre células adjacentes da parede celular. Dessa forma, alterações ou perdas de hemicelulose devido a sua degradação térmica podem causar importantes efeitos nas propriedades da madeira. Ao degradar a hemicelulose, o tratamento térmico reduz a quantidade de regiões polares livres para a absorção de água, o que pode causar uma redução da higroscopicidade da madeira e conseqüentemente uma redução nas alterações dimensionais.

Um estudo realizado por Unsal, Korkut e Atik (2003) onde amostras de eucalipto foram submetidas a tratamentos com 120, 150 e 180°C por 2, 6 e 10 horas, mostrou que houve variação na densidade, inchamento e dureza. Todas as propriedades apresentaram mudanças ao se aumentar a temperatura e a duração do tratamento, sendo que as maiores mudanças ocorreram com a aplicação da maior temperatura (180°C) e maior duração (10 horas).

O tratamento termomecânico aumenta a densidade da madeira através da compressão, reduzindo a quantidade de espaços vazios e melhorando algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira, que são afetadas pela densidade (BUSTOS, et al., 2011). Segundo Arruda et al. (2011) a combinação entre temperatura e pressão deve ser adequada à utilização final do produto de modo que a higroscopicidade seja reduzida ao mesmo tempo em que se observa a densificação da madeira.

Segundo Ulker, Imirzi e Burdurlu (2012), através da densificação, madeiras de baixa densidade podem adquirir propriedades de madeiras de maiores densidade, adquirindo aplicações mais amplas. O mesmo autor destaca que a espécie, temperatura e período de aplicação da pressão são as variáveis mais importantes e de maior influência nas propriedades do material. A temperatura tem a capacidade de transformar a madeira em um material macio e elástico, alterando assim suas propriedades.

A densificação melhora as propriedades mecânicas e reduz a higroscopicidade, entretanto, a compressão que ocorre durante o tratamento termomecânico é instável em função da temperatura e tempo (HEGER et al., 2004).

Uma pesquisa desenvolvida com tábuas de marupá (*Simarouba amara*), associando-se quatro temperaturas diferentes com pressão, mostrou que o aumento da pressão afetou negativamente a propagação da velocidade da onda na madeira e um aumento no módulo de elasticidade dinâmico. (FREITAS et al., 2015).

4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Tecnologia da Madeira (LTM) do Departamento de Engenharia Florestal (EFL) da Universidade de Brasília (UnB) e no Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB).

O painel MDP cru (sem revestimento) foi obtido no comércio de painéis de madeira de Brasília, nas dimensões de 275 cm (comprimento) x 183 cm (largura) x 1,5 cm (espessura). Este painel foi fabricado utilizando o adesivo ureia-formaldeído, que apresenta baixa resistência à umidade e a altas temperaturas.

Em seguida, foram confeccionadas 20 amostras de 40 cm x 40 cm x 1,5 cm. As amostras tiveram suas massas medidas em uma balança eletrônica com precisão de duas casas decimais, e espessuras medidas em quatro pontos por um paquímetro com precisão de duas casas decimais. Após isso, as amostras foram mantidas em câmara climatizada ($20 \pm 3^\circ\text{C}$; $65 \pm 1\%$ de umidade relativa do ar) até que atingissem massa constante.

4.1. Ensaio de compressão perpendicular ao plano do painel ($f_{c,90^\circ}$)

O ensaio de compressão perpendicular ao plano do painel teve como objetivo determinar a pressão a ser utilizada no tratamento termomecânico. Foram confeccionados nove corpos-de-prova (CPs) de 20 cm x 5 cm x 1,5 cm segundo a norma ASTM D143 (2000), com adaptações.

A $f_{c,90^\circ}$ foi calculada conforme Equação 1 e o valor utilizado correspondeu à média aritmética dos valores encontrados para os nove CPs.

$$f_{c,90^\circ} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Onde:

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

P = carga máxima, N;

A = área de compressão, mm².

A pressão utilizada na prensa hidráulica foi calculada de acordo com a Equação 2.

$$P_M = \frac{P_e \times A_c}{551,55} \quad (2)$$

Onde:

P_M = pressão no manômetro da prensa (kgf/cm²);

P_e = pressão pretendida, 25% ou 50% da f_{c,90°} (kgf/cm²);

A_c = área comprimida (cm²)

551,55 = área do pistão da prensa (cm²).

4.2. Tratamento termomecânico

Para o tratamento termomecânico, foi utilizado a prensa hidráulica (INDUMEC, 1000 kN), com controle de temperatura, através de um termômetro (CELTD890), e controle de pressão (Figura 1). O tratamento foi realizado no Laboratório de Tecnologia da Madeira (LTM), localizado na Fazenda Água Limpa – FAL/UnB.



Figura 1. Prensa hidráulica utilizada nos tratamentos termomecânicos.

Um pré-teste foi realizado, onde uma amostra de MDP foi colocada na prensa regulada à pressão de 25% da $f_{c,90^\circ}$ e temperatura de 160°C. O pré-teste consistiu em registrar a temperatura interna do painel a cada minuto, até atingir a temperatura de 160°C, aliviar a pressão à metade e manter o painel na prensa por mais dez minutos, e por fim aliviar a pressão 100% e manter o painel por mais cinco minutos. A pressão foi aliviada gradativamente para diminuir o efeito chamado de “*springback*”, também conhecido como efeito mola, caracterizado pela expansão do material quando se alivia a pressão.

Foram testados quatro tratamentos diferentes, oriundos da combinação de duas temperaturas (150°C e 170°C) e duas pressões (25 e 50% da $f_{c,90^\circ}$), descritos na Tabela 1. Para cada tratamento foram feitas quatro repetições, resultando em 16 amostras densificadas, e quatro amostras foram mantidas sem tratamento termomecânico e utilizadas como testemunhas.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos termomecânicos.

| Tratamento | Repetições | Temperatura (°C) | Pressão (%) |
|------------|------------|------------------|-------------|
| T1 | 4 | 150 | 25 |
| T2 | 4 | 150 | 50 |
| T3 | 4 | 170 | 25 |
| T4 | 4 | 170 | 50 |

O tratamento termomecânico consistiu em colocar a amostra na prensa, com um termopar inserido na metade da espessura do painel, para controle da temperatura. O termômetro foi programado para registrar a temperatura a cada 20 segundos, enquanto que com a ajuda de um cronômetro foi registrado o tempo necessário para atingir a temperatura interna desejada. Atendida a temperatura interna desejada, o painel foi mantido sob pressão por mais dez minutos, em seguida aliviou-se 50% da pressão e o painel foi mantido por mais cinco minutos, findo o qual, foi aliviada 100% da pressão e o painel mantido por mais cinco minutos, conforme ilustrado na Figura 2. Após o tratamento termomecânico as amostras foram colocadas novamente em câmara climatizada até que atingissem massa constante.

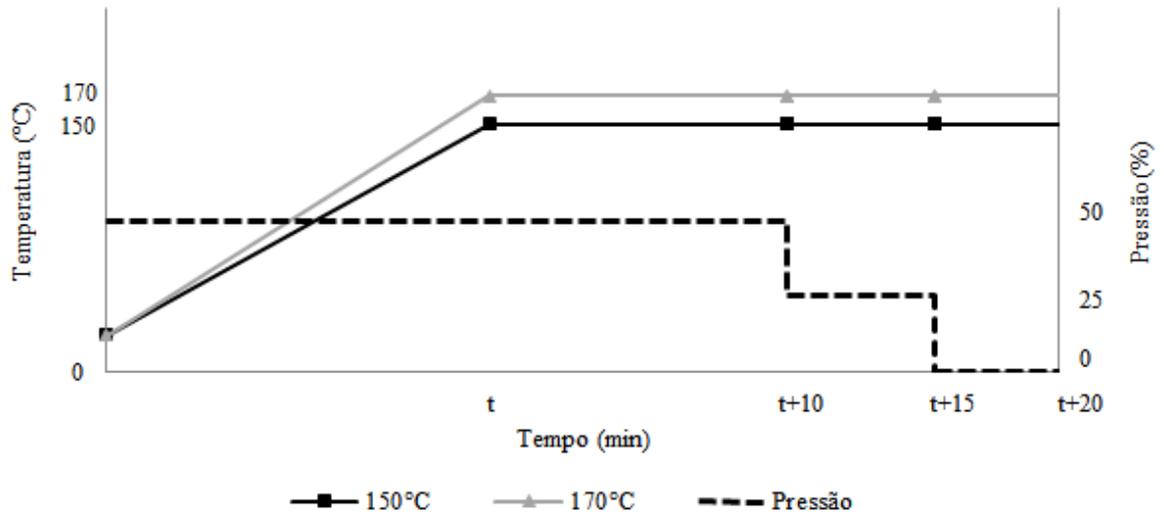


Figura 2. Esquema geral do tratamento termomecânico.

4.3. Caracterização do tratamento termomecânico

Após o tratamento termomecânico, foram calculadas as taxas de compactação (Equação 3), taxa de densificação (Equação 4) e a perda de massa (Equação 5). Para a obtenção dessas variáveis foram medidas as espessuras em quatro pontos do painel e a massa, antes e depois do tratamento.

$$TXC = \left(\frac{E_{inicial} - E_{final}}{E_{inicial}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

TXC = taxa de compactação, %;

$E_{inicial}$ = média aritmética das espessuras nos quatro pontos antes do tratamento termomecânico, cm;

E_{final} = média aritmética das espessuras nos quatro pontos depois do tratamento termomecânico, cm.

$$TXD = \left(\frac{\rho_{final} - \rho_{inicial}}{\rho_{inicial}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

TXD = taxa de densificação, %;

$\rho_{inicial}$ = densidade antes do tratamento termomecânico, kg/m³;

ρ_{final} = densidade depois do tratamento termomecânico, kg/m³.

$$PM = \left(\frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

PM = perda de massa, %;

$M_{inicial}$ = massa antes do tratamento termomecânico, g;

M_{final} = massa depois do tratamento mecânico, g.

4.4. Caracterização das propriedades físicas e mecânicas

A caracterização dos efeitos do tratamento termomecânico sobre as propriedades físicas e mecânicas dos painéis foi feita segundo a norma ASTM D1037 (2012) com adaptações, e os ensaios foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaios (EMIC DL 30000), conforme ilustrado na Figura 3.

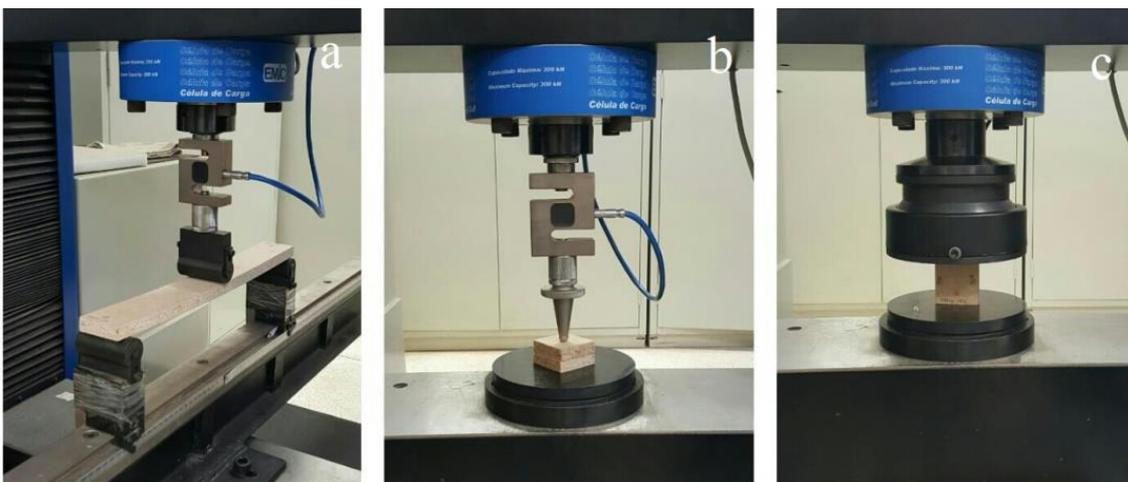


Figura 3. a) Ensaio de flexão estática. b) Ensaio de dureza superficial. c) Ensaio de compressão paralela ao plano do painel.

Foram determinadas as seguintes propriedades: módulo de ruptura em flexão estática, módulo de elasticidade em flexão estática, módulo de elasticidade dinâmica, resistência à compressão paralela ao plano do painel, dureza superficial, densidade, inchamento e absorção de água após 2, 24, e 72 horas de imersão, taxa de não retorno em espessura e teor de umidade de equilíbrio.

4.4.1. Densidade aparente

A densidade aparente (kg/m^3) foi calculada de acordo com a Equação 6 antes e depois do tratamento termomecânico. Foram medidas as espessuras em quatro pontos do painel, com o auxílio de um paquímetro, e a massa (g) utilizando-se uma balança com duas casas decimais de precisão.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (6)$$

Onde:

ρ = densidade aparente, kg/m^3 ;

M = massa, g;

v = volume, cm^3 .

4.4.2. Ensaio de imersão

Foram utilizados 80 CPs nas dimensões 5 cm x 5 cm, e espessuras variando de acordo com o tratamento, sendo 16 CPs por tratamento e 16 testemunhas. O ensaio consistiu em medir a espessura e a massa de cada CP após 2, 24 e 72 horas de imersão. Foram medidas as espessuras (mm) em 5 pontos do CP, utilizando-se um relógio comparador digital (STARRETT) com precisão de três casas decimais, e medidas as massas (g) utilizando-se uma balança eletrônica de precisão de duas casas decimais (Figura 4).



Figura 4. a) Balança eletrônica. b) Relógio comparador digital.

Foram calculados o inchamento em espessura (Equação 7), a absorção (Equação 8), taxa de não retorno em espessura (Equação 9), e teor de umidade de equilíbrio (Equação 10).

$$IE = \left(\frac{E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}}}{E_{\text{inicial}}} \right) \times 100 \quad (7)$$

Onde:

IE = inchamento em espessura, %;

E_{inicial} = média das espessuras nos cinco pontos antes da imersão, mm.

E_{final} = média das espessuras nos cinco pontos após da imersão, mm;

$$ABS = \left(\frac{M_{\text{final}} - M_{\text{inicial}}}{M_{\text{inicial}}} \right) \times 100 \quad (8)$$

Onde:

ABS = absorção, %;

M_{inicial} = massa antes da imersão, g.

M_{final} = massa após da imersão, g;

$$TNRE = \left(\frac{E_{final} - E_{inicial}}{E_{inicial}} \right) \times 100 \quad (9)$$

Onde:

TNRE = taxa de não retorno em espessura, %;

$E_{inicial}$ = média das espessuras nos cinco pontos depois da imersão e seca em estufa, mm.

E_{final} = média das espessuras nos cinco pontos antes da imersão, mm;

$$TUE = \left(\frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{final}} \right) \times 100 \quad (10)$$

Onde:

TUE = teor de umidade de equilíbrio, %;

$M_{inicial}$ = massa antes da imersão, g.

M_{final} = massa após secagem em estufa, g.

4.4.3. Ensaio de ondas de tensão

O ensaio de ondas de tensão foi realizado antes e depois do tratamento termomecânico nas 20 amostras (tratadas e não tratadas) nas dimensões de 40 cm x 40 cm x 1,5 cm utilizando-se o equipamento *Stress Wave Timer* Metriguard 239^a (Figura 5). Este equipamento mede o tempo que uma onda demora para passar da fonte geradora até a fonte receptora.

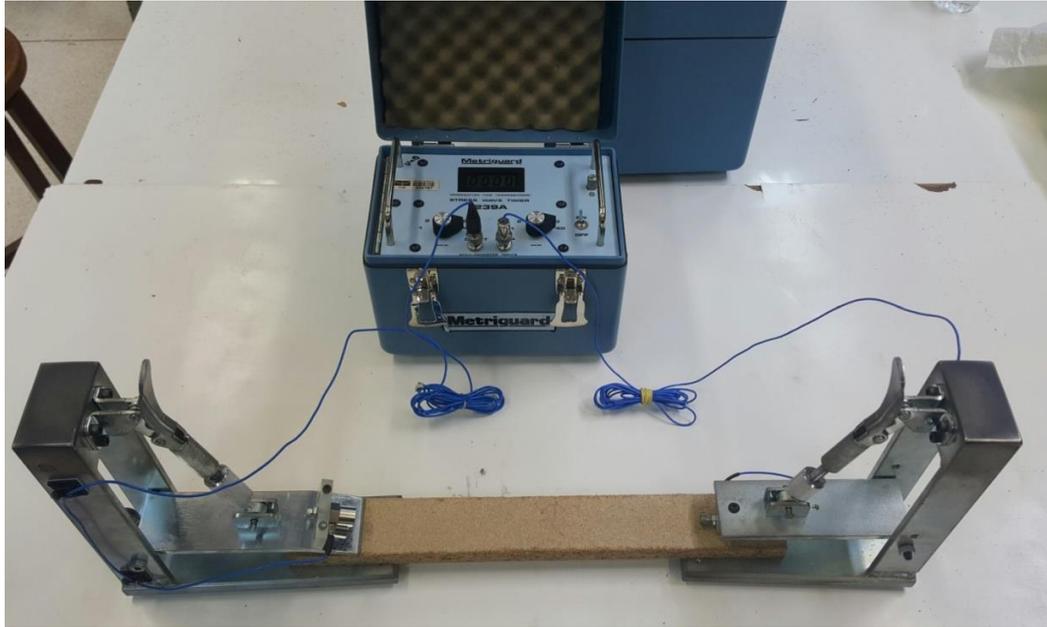


Figura 5. *Stress Wave Timer*.

As garras do equipamento foram posicionadas à 5 cm de distância da borda da amostra, e foram feitas três leituras. Utilizando-se dos dados de densidade específica e velocidade de propagação da onda, o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi calculado através da Equação 11:

$$E_d = v^2 \times \rho \quad (11)$$

Onde:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico, MPa;

v = velocidade (distância/tempo), m/s;

ρ = densidade do painel, kg/m³.

4.4.4. Ensaio de flexão estática

Para o ensaio de flexão estática foram utilizados 16 CPs por tratamento e 16 testemunhas. Os CPs possuíam dimensões de 40 cm x 5 cm e espessuras variando de acordo com o tratamento. O vão utilizado para a distância do apoio em cada tratamento foi de 24

vezes a espessura do CP, de acordo com cada tratamento. Na Tabela 2 são apresentadas as dimensões e vãos para cada tratamento.

Tabela 2. Dimensões e vãos dos corpos-de-prova do ensaio de flexão.

| Tratamento | Comprimento (cm) | Largura (cm) | Espessura (cm) | Vão (cm) |
|------------|------------------|--------------|----------------|----------|
| 1 | 40 | 5 | 1,4 | 33,7 |
| 2 | 40 | 5 | 1,3 | 30,5 |
| 3 | 40 | 5 | 1,4 | 33,5 |
| 4 | 40 | 5 | 1,2 | 30,0 |
| Testemunha | 40 | 5 | 1,5 | 37,0 |

O módulo de ruptura (f_m) e módulo de elasticidade (E_M) em flexão estática, foram determinados de acordo com as Equações 12 e 13, respectivamente.

$$f_m = \frac{M}{w} \quad (12)$$

Onde:

f_m = módulo de ruptura em flexão estática, Kgf/cm², convertido em MPa;

M = momento fletor máximo, Kgf.cm;

w = módulo de resistência [largura*(espessura²)]/6, cm³.

$$E_M = \frac{P \times L^3}{48 \times \Delta \times I} \quad (13)$$

Onde:

E_M = módulo de elasticidade em flexão estática, Kgf/cm², convertido em MPa;

P = força, Kgf;

L = vão, cm;

Δ = deslocamento, cm;

I = momento de inércia, cm⁴.

4.4.5. Ensaio de dureza superficial (f_H)

Para o ensaio de dureza superficial (f_H), cada CP foi confeccionado a partir da colagem de dois CPs nas dimensões 5 cm x 5 cm e espessuras variando de acordo com cada tratamento, totalizando 16 CPs por tratamento e 16 testemunhas. O ensaio consistiu em determinar a força necessária para fazer penetrar metade do diâmetro de uma esfera de 1 cm² de área na superfície do material.

4.4.6 Ensaio de compressão paralela ao plano do painel ($f_{c,0^\circ}$)

Para o ensaio de compressão paralela ao plano do painel foram utilizados 16 CPs por tratamento e 16 testemunhas, com dimensões variando de acordo com o tratamento, onde o comprimento corresponde a quatro vezes a espessura média dos CPs, de acordo com o tratamento, como é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Dimensões dos CPs do ensaio de compressão paralela ao plano do painel.

| Tratamento | Comprimento (cm) | Largura (cm) | Espessura (cm) |
|------------|------------------|--------------|----------------|
| 1 | 5,6 | 5 | 1,4 |
| 2 | 5,1 | 5 | 1,3 |
| 3 | 5,6 | 5 | 1,4 |
| 4 | 5,0 | 5 | 1,2 |
| Testemunha | 6,2 | 5 | 1,5 |

A $f_{c,0^\circ}$ foi calculada de acordo com a Equação 14 a seguir:

$$f_{c,0^\circ} = \frac{P}{A} \quad (14)$$

Onde:

$f_{c,0^\circ}$ = resistência à compressão paralela ao plano do painel, Kgf/cm², convertido em MPa;

P = força máxima, kgf/cm²;

A = área de compressão, cm².

4.5. Análise de dados

As variáveis referentes ao tratamento termomecânico, Taxa de Densificação (TXD), Taxa de Compactação (TXC) e Perda de Massa (PM) foram analisadas inicialmente pelo teste de Tukey B, onde foram avaliadas as diferenças significativas entre os quatro tratamentos com relação à testemunha. Em seguida foi feita a Análise de Variância Fatorial (2x2) onde verificou-se o fator que apresentou maior influência nas propriedades (pressão, temperatura).

As propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas pelo teste de média de Dunnett, que fez a comparação da testemunha com cada um dos tratamentos, e em seguida pela Análise de Variância Fatorial, para verificar o fator de maior influência. Os resultados do ensaio de ondas de tensão realizado com o *Stress Wave* foi analisado por meio do teste t-pareado, comparando-se os resultados antes e depois do tratamento. Todas as análises foram feitas ao nível de 5% de significância, utilizando-se o programa SPSS 20.0.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Tratamento termomecânico

A duração média dos tratamentos foi de 38 minutos, variando de 35 minutos a 40 minutos, do tratamento T1 (150°C – 25% da $f_{c,90^\circ}$) ao T4 (170°C - 50% da $f_{c,90^\circ}$), respectivamente, e a densidade dos painéis antes do tratamento foi em média de 0,65 g/cm³. Foi possível observar que o tempo de tratamento diminuiu conforme aumentou a temperatura e a pressão, sendo que o tratamento que apresentou maior duração foi o T1 e o de menor duração o T4. Isso se deve ao fato do tratamento T1 ter sido o de menor severidade, levando um tempo maior para atingir a temperatura interna desejada, enquanto que o tratamento T4, o mais severo, levou um tempo menor para atingir a temperatura interna.

Segundo Figueroa e Moraes (2009), a transição vítrea é a passagem de um estado desordenado rígido de um polímero para um estado desordenado maior. As cadeias poliméricas possuem uma maior mobilidade, que no caso da hemicelulose, celulose e lignina, dá origem a um comportamento menos rígido. Os mesmos autores afirmam ainda, que a transição vítrea dos polímeros da madeira ocorre preferencialmente a altas temperaturas, quando a taxa de degradação é significativa. A temperatura de transição vítrea da celulose situa-se entre 200°C e 250°C, enquanto que para as hemiceluloses situa-se na faixa de 150°C e 220°C.

A Figura 6 apresenta a variação da temperatura interna dos painéis, podendo ser observado três fases distintas: a primeira fase corresponde a um rápido aquecimento da temperatura inicial do painel (que variou de 29°C a 38°C) até atingir 100°C, devido a grande presença de água; a segunda fase vai da temperatura de 100°C até ser atingida a temperatura desejada para cada tratamento (150°C e 170°C); e a terceira fase é caracterizada pela estabilização da taxa de aquecimento.

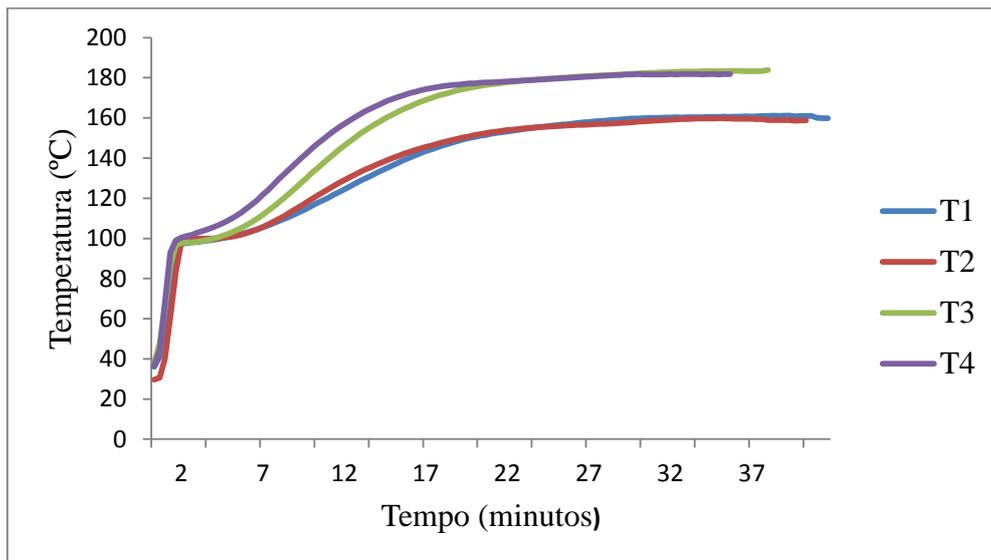


Figura 6. Variação da temperatura interna dos painéis.

A degradação da madeira através do calor e sem combustão, é chamada de pirólise, cujas fases podem ser identificadas pela sua perda de massa que ocorre por influência das reações químicas ocorridas durante a elevação da temperatura (Brito et al., 2006). Segundo Pinto e Junior (2003) na fase de degradação térmica da madeira que ocorre até 200°C há a liberação de água e gases, perdendo massa de forma uniforme caso o aquecimento seja lento. A Figura 7 mostra o efeito do tratamento termomecânico sobre as espessuras dos painéis em cada um dos tratamentos comparados com as testemunhas, onde os tratamentos de maior densidade foram os tratamentos T2 e T4 e os de menor espessura os tratamentos T1 e T3.



Figura 7. Ilustração das espessuras da amostra não tratada (NT) e dos quatro tratamentos (T1, T2, T3 e T4).

A análise de Tukey B (Figura 8) mostrou que os tratamentos T1 e T3 foram estatisticamente iguais para a Taxa de Densificação (TXD) apesar de ter ocorrido um aumento na densidade. Em estudo realizado por Brito et al. (2006), onde madeira de *Eucalyptus grandis* foi submetida a diferentes temperaturas de termorretificação (120, 140, 160, 180 e 200°C), verificou-se que as diferentes temperaturas não exerceram influências significativas nas densidades das madeiras, apesar de haver uma tendência de aumento no valor da densidade. Isto pode ocorrer porque apenas o aumento da temperatura não é suficiente para provocar uma perda de massa na mesma proporção da redução do volume.

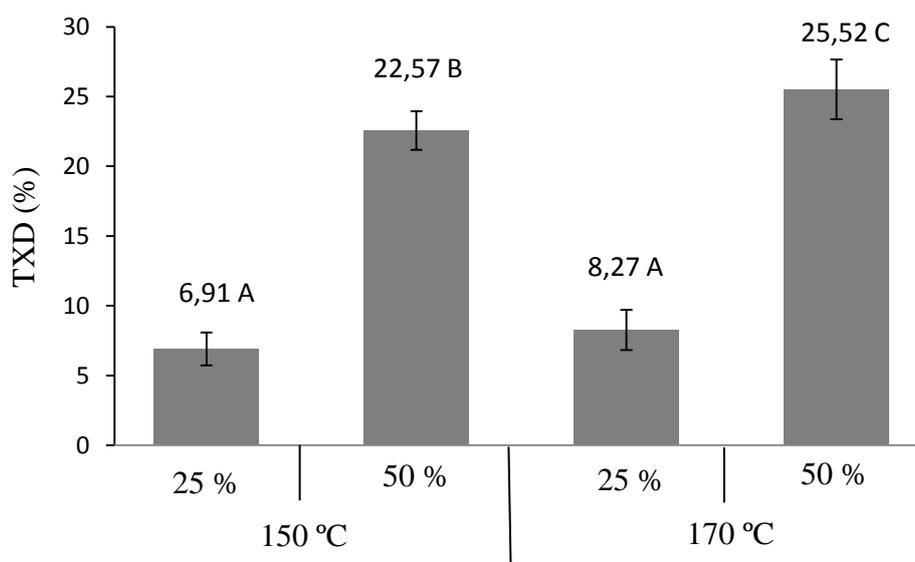


Figura 8. Taxa de densificação (TXD). Análise estatística pelo teste de Tukey B ao nível de 5% de significância, onde letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes.

Os tratamentos T2 e T4 apresentaram diferenças estatisticamente significativas dos tratamentos T1 e T3, podendo indicar que uma maior pressão associada a altas temperaturas pode favorecer o aumento da densidade do painel. Como esperado, o tratamento de maior temperatura e maior pressão (T4) foi o que apresentou maior TXD (25,52%) e o tratamento de menor temperatura e menor pressão (T1) foi o que apresentou menor TXD (6,91%).

Mantendo-se a temperatura e aumentando-se a pressão de 25% para 50% da $f_{c,90^\circ}$, foi observado um aumento de 227% na TXD do tratamento T1 para o T2 e de 209% do T3 para o T4. Mantendo-se a pressão e aumentando-se a temperatura de 150 para 170°C, foi observado um ganho de apenas 20% do T1 para o T3 e de 13% do T2 para o T4 na TXD. Isso pode indicar uma maior influência da pressão na TXD, causando uma redução dos espaços vazios através da compressão da estrutura do painel, aumentando assim a sua densidade.

Resultados semelhantes foram encontrados nas Taxas de Compactação (TXC) de acordo com a análise de Tukey B (Figura 9). O T1 foi o que apresentou menor TXC (13,06%) e o T4 o que apresentou a maior TXC (27,20%). Assim como a TXD, o aumento na severidade do tratamento ocasionou um aumento na TXC e conseqüentemente uma redução na espessura do painel, entretanto, todos os tratamentos apresentaram diferenças estatisticamente significativas, podendo indicar que mesmo utilizando-se uma pressão menor o aumento na temperatura causa uma redução significativa na espessura do painel.

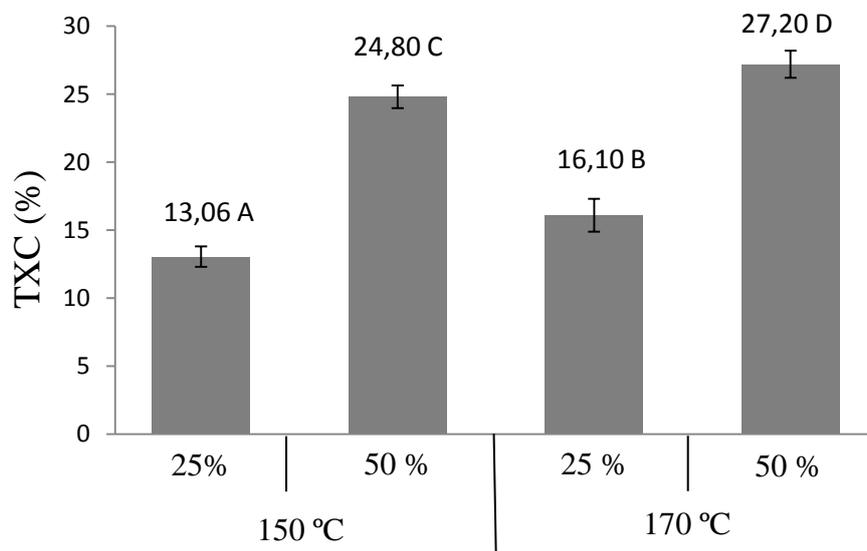


Figura 9. Taxa de compactação (TXC). Análise estatística pelo teste de Tukey B ao nível de 5% de significância, onde letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes.

O aumento na TXC mantendo-se a temperatura foi de 90% do T1 para o T2, e de 69% do T3 para o T4. Entretanto, mantendo-se a pressão constante, o aumento foi de apenas 23%

do T1 para o T3, e de 10% do T2 para o T4. Isto pode indicar que o aumento na pressão representa um ganho maior na TXC, assim como na TXD.

A variável Perda de Massa (PM) apresentou resultados diferentes. O tratamento que apresentou maior PM foi T3 (10,09%) e o de menor PM foi o T1 (7,59%). Os tratamentos T3 e T4 foram estatisticamente iguais, e os tratamentos T1 e T2 apresentaram diferenças estatisticamente significativas, conforme a Figura 10. O aumento da pressão resultou em um aumento de 12% na PM do T1 para o T2 e uma redução de 6% do T3 para o T4, já o aumento da temperatura do T1 para o T3 resultou em um aumento de 33% e do T2 para o T4 de 11%. Neste caso, a PM foi maior quando se aumentou a temperatura de 150 para 170°C mantendo-se a pressão a 25%.

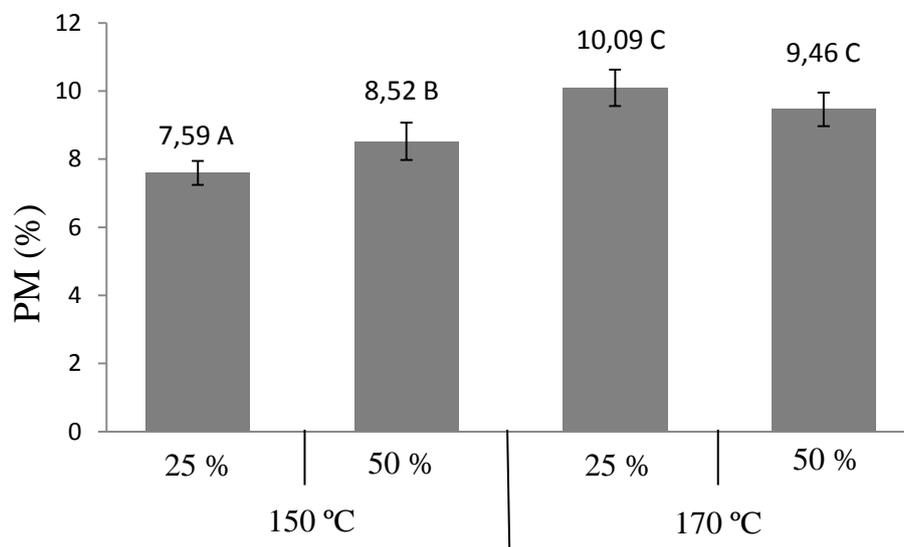


Figura 10. Perda de massa (PM). Análise estatística pelo teste de Tukey B ao nível de 5% de significância, onde letras diferentes representam valores estatisticamente diferentes.

Moura, Brito e Junior (2012) ao aplicarem a termorretificação em madeiras de eucalipto e pinus, verificaram que a temperatura pode causar uma maior perda de massa, refletindo em uma perda de resistência mecânica da madeira.

Os tratamentos de maior temperatura (T3 e T4) apresentaram maior PM como esperado, entretanto, o aumento da pressão de 25% para 50% causou uma redução da PM, podendo indicar que o aumento da TXD e da TXC ocasionado pelo aumento da pressão causou um efeito positivo na PM. À temperaturas mais brandas (150°C) o aumento da TXD e da TXC não foi suficiente para causar o mesmo efeito positivo na PM.

Na Tabela 4 são apresentados os valores da análise fatorial para as variáveis TXD, TXC e PM. Ambos os fatores foram estatisticamente significativos sobre a TXD e TXC, entretanto os tratamentos de maior pressão (T4) apresentaram os maiores valores, como esperado. Quanto a PM apenas o fator temperatura foi estatisticamente significativo, sendo o tratamento de maior temperatura (T3) o de maior PM, indicando que o fator temperatura do tratamento termomecânico contribuiu para a degradação de compostos higroscópicos do painel. Apesar do fator pressão não apresentar efeito significativo, foi observado uma redução da PM ao se aumentar a pressão à 170°C, indicando assim um efeito positivo nesta propriedade.

Tabela 4. Análise fatorial das variáveis TXD, TXC e PM do tratamento termomecânico.

| Propriedade | Fator | | | |
|-------------|------------------|--------|--------------------|--------------------|
| | Temperatura (°C) | | Pressão (%) | |
| | 150 | 170 | 25 | 50 |
| TXD (%) | 14,74* | 16,90* | 7,59* | 24,04* |
| TXC (%) | 18,93* | 21,65* | 14,58* | 26,00* |
| PM (%) | 8,06* | 9,78* | 8,84 ^{NS} | 8,99 ^{NS} |

TXD= taxa de densificação; TXC = taxa de compactação; PM = perda de massa; *valores significativos ao nível de 5% de significância; ^{NS} não significativo.

5.2. Propriedades Mecânicas

O tratamento termomecânico provocou uma redução no módulo de ruptura em flexão estática (f_m), módulo de elasticidade em flexão estática (E_M) e resistência à compressão paralela ao plano do painel ($f_{c,0}$). Foi observado uma melhora significativa da propriedade dureza superficial (f_H) em todos os tratamentos. Os valores médios obtidos pelo teste de Dunnett, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores médios do teste de Dunnett para as propriedades mecânicas.

| Tratamento | Propriedades mecânicas | | | |
|------------------|------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|
| | f_m (MPa) | E_M (MPa) | f_H (N) | $f_{c,0^\circ}$ (MPa) |
| T1 (150°C - 25%) | 11,09* | 2270,88 ^{NS} | 4148,91* | 8,34 ^{NS} |
| T2 (150°C - 50%) | 11,27* | 1921,00* | 5829,53* | 8,95 ^{NS} |
| T3 (170°C - 25%) | 8,28* | 1803,80* | 4235,42* | 5,36* |
| T4 (170°C - 50%) | 10,00* | 2228,72 ^{NS} | 5528,36* | 8,18 ^{NS} |
| Testemunha | 13,78 | 2468,15 | 3447,77 | 8,97 |

f_m = módulo de ruptura em flexão estática; E_M = módulo de elasticidade em flexão estática; f_H = dureza superficial; $f_{c,0^\circ}$ = resistência à compressão paralela ao plano do painel; *valores significativos ao nível de 5% de significância; ^{NS} não significativo.

O módulo de ruptura em flexão estática apresentou redução estatisticamente significativa em todos os tratamentos. A maior redução foi no tratamento T3 (40%) e a menor no tratamento T2 (18%). Os tratamentos de menor temperatura (T1 e T2) apresentaram menor perda. O módulo de elasticidade em flexão estática sofreu redução nos tratamentos T2 e T3, com perdas de 22 e 27%, respectivamente. Os tratamentos T1 e T4 apresentaram perdas nesta propriedade, mas não foram significativas. Isto pode significar que o painel tratado termomecânicamente aumenta sua capacidade de deformar elasticamente e apresenta rupturas mais frágeis quando submetido à flexão.

Em estudo realizado por Cloutier et al. (2008), o tratamento termomecânico aplicado a Aspen (*Populus tremuloides*) causou um aumento significativo no módulo de elasticidade e no módulo de ruptura, mas apresentou uma tendência a diminuir com o aumento da temperatura. A dureza superficial foi a única propriedade mecânica na qual o tratamento termomecânico provocou um aumento, com ganho estatisticamente significativo em todos os tratamentos, devido a densificação do painel. O tratamento que apresentou maior ganho foi o T2 (69%) e o que apresentou o menor ganho foi o T1 (20%), evidenciando a influência significativa da pressão nesta propriedade.

O tratamento termomecânico provocou redução, estatisticamente significativa, na $f_{c,0^\circ}$ apenas no tratamento T3, no qual houve uma perda de 40%. Os demais tratamentos apresentaram perdas mas não foram significativas.

Heger et al. (2004), em estudo sobre a performance do tratamento termomecânico verificaram uma diminuição das propriedades mecânicas quando a madeira foi tratada com temperaturas superiores à 180°C.

Como esperado, foi possível observar que os tratamentos que apresentaram a maior redução nas propriedades mecânicas foram os que tiveram também a maior perda de massa. Apesar de uma redução nas propriedades devido ao aumento da temperatura, de modo geral os tratamentos de maior densidade foram os que apresentaram menor perda nas propriedades mecânicas.

A análise fatorial, cujos valores são apresentados na Tabela 6, mostra se os fatores temperatura e pressão tiveram efeitos significativos nas propriedades mecânicas, ao nível de 5% de significância.

Tabela 6. Análise fatorial das propriedades mecânicas.

| Propriedade | Fator | | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|----------|
| | Temperatura (°C) | | Pressão (%) | |
| | 150 | 170 | 25 | 50 |
| f_m (MPa) | 10,98* | 9,14* | 9,59* | 10,39* |
| E_M (MPa) | 2117,16 ^{NS} | 2016,26 ^{NS} | 2031,41* | 2096,03* |
| f_H (N) | 4846,07 ^{NS} | 4881,39 ^{NS} | 4193,05* | 5637,70* |
| $f_{c,0^\circ}$ (MPa) | 8,45* | 6,77* | 6,84* | 8,32* |

f_m = módulo de ruptura em flexão estática; E_M = módulo de elasticidade em flexão estática; f_H = dureza superficial; $f_{c,0^\circ}$ = resistência à compressão paralela ao plano do painel; *valores significativos ao nível de 5% de significância; ^{NS} não significativo.

O módulo de ruptura em flexão estática sofreu efeito significativo de ambos os fatores, sendo o tratamento T2 o de menor redução, como pode ser observado na Tabela 5. O módulo de elasticidade em flexão estática sofreu efeito estatisticamente significativo apenas da pressão, mostrando que a temperatura não influenciou significativamente na redução desta propriedade.

Iwakiri et al. (2008) ao estudarem a influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas de painéis aglomerados, observaram que tanto para f_m quanto para E_M o aumento na massa específica resultou em melhora nessas propriedades, concluindo que houve um incremento proporcionalmente maior dessas propriedades com o aumento da massa específica de 0,57 g/cm³ para 0,64 g/cm³ e de 0,70 g/cm³ para 0,78 g/cm³, do que de 0,64 g/cm³ para 0,70 g/cm³, onde os valores médios foram estatisticamente iguais. Tal

comportamento não foi observado no presente trabalho, onde o aumento da densidade não contribuiu para a melhora dessas propriedades.

Segundo Moura, Brito e Junior (2012) a temperatura possui efeito significativamente maior sobre o módulo de ruptura do que sobre o módulo de elasticidade. Ao estudarem o efeito da termorretificação com diferentes temperaturas (140, 160, 180 e 200 °C), verificaram que a madeira termorretificada tende a aumentar sua capacidade de se opor a deformações elásticas quando sujeita a solicitações mecânicas, diminuindo a flecha que precede a ruptura, apresentando rupturas mais frágeis (menos dúcteis) que aquelas observadas em madeiras não tratadas (efeito constatado apenas em *Eucalyptus*). Os mesmos autores citam que a eliminação dos carboidratos durante o tratamento térmico e a consequente perda de massa foi a principal causa de redução da resistência mecânica em madeiras tratadas.

A dureza superficial sofreu efeito estatisticamente significativo apenas da pressão, sendo que ambas as pressões (25 e 50%) contribuíram para a melhora desta propriedade. Os tratamentos de maior pressão (T2 e T4), que apresentaram também maior TXD e TXC foram os de maior f_H , entretanto o melhor tratamento foi o T2, demonstrando que para esta propriedade podem ser usadas temperaturas mais amenas para a obtenção de resultados satisfatórios.

A $f_{c,0}$ sofreu influência significativa de ambos os fatores, entretanto, como visto na Tabela 5, apenas o tratamento T3 apresentou diminuição estatisticamente significativa, evidenciando que altas temperaturas influenciam negativamente essa propriedade e maiores pressões podem contribuir para uma redução nessa perda.

Espera-se que a temperatura piore as propriedades mecânicas enquanto que o tratamento termomecânico melhore essas propriedades através do aumento da densidade. O presente trabalho mostrou que o efeito positivo da pressão ao se aumentar a densidade não foi suficiente para compensar o efeito negativo da temperatura.

O ensaio de ondas de tensão realizado com o *Stress Wave* foi analisado pelo teste t-pareado ao nível de 5% de significância, onde foram comparados os valores das densidades, velocidade de propagação da onda e o módulo de elasticidade dinâmico antes e depois do tratamento termomecânico, cujos valores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores médios do teste t-pareado para o ensaio não destrutivo de ondas de tensão realizado com o *Stress Wave*.

| Propriedade | Tratamento (°C - %) | | | |
|------------------------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|
| | T1 (150 - 25) | T2 (150 - 50) | T3 (170 - 25) | T4 (170 - 50) |
| ρ antes (kg/m ³) | 650,42 | 647,98 | 647,95 | 649,20 |
| ρ depois (kg/m ³) | 704,46* | 775,93* | 699,77* | 785,09* |
| V antes (m/s) | 2125,25 | 2179,25 | 2264,25 | 2196,00 |
| V depois (m/s) | 2083,36* | 2161,59* | 2228,00* | 2196,37 |
| E_d antes (Mpa) | 2945,75 | 30825 | 3322,50 | 3134,00 |
| E_d depois (Mpa) | 3068,33* | 3632,07* | 3474,17* | 3791,53* |

ρ = densidade; V= velocidade de propagação da onda; E_d = módulo de elasticidade dinâmico; *valores significativos ao nível de 5% de significância; ^{NS} não significativo.

A densidade aparente apresentou aumento estatisticamente significativo em todos os tratamentos, sendo o maior aumento no tratamento T4 (21%) e o menor no tratamento T1 e T3 (8%), mostrando que o tratamento mais severo (maior temperatura e maior pressão) foi responsável pelo maior aumento da densidade do painel, como pode ser visto na Figura 7.

A velocidade de propagação apresentou redução significativa nos tratamentos T1, T2 e T3, e aumento não significativo no tratamento T4. O tratamento de maior redução foi o tratamento T1 (2%) e o de menor redução o tratamento T2 (0,8%).

O módulo de elasticidade dinâmico apresentou aumento significativo em todos os tratamentos, onde o tratamento que apresentou maior ganho para esta propriedade foi o T4, com um aumento de 21%, e o de menor ganho foi o tratamento T1 (4%).

Foi possível observar que os tratamentos que tiveram maior ganho na densidade aparente foram os que apresentaram o maior ganho no módulo de elasticidade dinâmico, indicando que são grandezas diretamente proporcionais. Del Menezzi, Tomaselli e Santos (2007) verificaram que tratamentos térmicos aplicados em painéis OSB mais severos tendem a aumentar a velocidade de propagação pois causam uma maior perda de massa e reduzem a higroscopicidade dos painéis. Entretanto, no presente trabalho, houve uma redução na velocidade comparado a testemunha e um aumento no módulo de elasticidade devido ao aumento da densidade.

De acordo com Freitas, Gonzalez e Del Menezzi (2015) espera-se que com esse tipo de tratamento a pressão provoque um aumento da velocidade da onda de tensão. A diminuição da descontinuidade interna causada pela pressão deve facilitar a propagação interna através da diminuição de espaços vazios internos. Neste caso, a diminuição da velocidade da onda de tensão verificada pode ser explicada por colapsos celulares que causaram a descontinuidade interna, dificultando a propagação das ondas.

5.3. Propriedades físicas

A estabilidade dimensional pode ser caracterizada através do inchamento em espessura (IE), absorção (ABS), taxa de não retorno em espessura (TNRE) e do teor de umidade de equilíbrio (TUE). Os valores médios avaliados de acordo com o teste de Dunnett, ao nível de 5% de significância, são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Valores médios do teste de Dunnett para as propriedades físicas.

| Tratamento | Propriedades físicas (%) | | | | | | | |
|------------------|--------------------------|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| | IE 2h | IE 24h | IE 72h | ABS 2h | ABS 24h | ABS 72h | TNRE | TUE |
| T1 (150°C - 25%) | 8,22* | 27,79* | 38,78* | 8,36* | 43,03* | 75,11 ^{NS} | 40,21 ^{NS} | 8,73* |
| T2 (150°C - 50%) | 11,13* | 41,72* | 52,99* | 7,94* | 49,09 ^{NS} | 75,85 ^{NS} | 57,29* | 9,01 ^{NS} |
| T3 (170°C - 25%) | 8,22* | 42,17* | 57,80* | 8,20* | 59,49* | 96,38 ^{NS} | 56,03* | 9,73* |
| T4 (170°C - 50%) | 11,85* | 55,71* | 69,10* | 8,28* | 60,59* | 90,90 ^{NS} | 72,39* | 9,50 ^{NS} |
| Testemunha | 5,79 | 22,26 | 33,22 | 10,20 | 46,79 | 76,77 | 36,91 | 9,15 |

IE 2h, 24h e 72h= inchamento em espessura após 2, 24 e 72 horas de imersão; ABS 2h, 24h e 72h= absorção após 2, 24 e 72 de imersão; TNRE= taxa de não retorno em espessura; TUE= teor de umidade de equilíbrio; *valores significativos ao nível de 5% de significância; ^{NS} não significativo de acordo com o teste de Dunnett.

O tratamento termomecânico provocou um aumento estatisticamente significativo no IE em todos os períodos de imersão, o que indicou um efeito negativo nessa propriedade. Em 2h de imersão o tratamento que apresentou maior aumento foi o T4 com um aumento de

105% e o de menor foi o T1 e T3, com um aumento de 42%. O tratamento de maior aumento em 24h de imersão foi o T4 (150%) e o de menor o T1 (25%). Em 72h de imersão o tratamento que apresentou maior efeito negativo foi o T4 (108%) e o de menor efeito negativo o T1 (17%).

Os resultados do presente trabalho mostraram que o aumento da severidade do tratamento, bem como o aumento da densidade aparente, provocaram um aumento na IE, que pode estar relacionado à liberação das tensões de compressão decorrentes da densificação do material. Foi possível observar também, que o tratamento que apresentou a menor perda de massa e menor densidade aparente foi o que apresentou o menor inchamento em espessura.

Em 2h de imersão, todos os tratamentos afetaram positivamente a absorção apresentando uma redução de 22% (T2) a 18% (T1), indicando um aumento na permeabilidade devido à redução de espaços vazios na camada superficial do painel, que dificultou a adsorção inicial de água. Em 24h de imersão o tratamento T2 não apresentou efeito significativo, entretanto, os tratamentos T3 e T4 provocaram um aumento desta propriedade de 27 e 29% respectivamente. Já o tratamento T1 provocou efeito positivo significativo, reduzindo em 8% a ABS. Em 72h os tratamentos T1 e T2 provocaram efeito positivo e os tratamentos T3 e T4 efeito negativo, entretanto nenhum foi estatisticamente significativo.

Melo e Del Menezzi (2010) ao avaliarem a influência da massa específica nas propriedades físicas e na resistência mecânica de painéis aglomerados confeccionados com partículas da madeira de *Eucalyptus grandis*, verificaram que o aumento da densidade provocou uma redução na absorção e uma redução no inchamento. No presente trabalho, foram encontrados resultados diferentes para a absorção, onde houve melhora apenas em 2h de imersão.

A TNRE apresentou aumento em todos os tratamentos, embora o tratamento T1 não tenha sofrido efeito estatisticamente significativo. O tratamento de maior aumento foi o T4 (96%) e o de menor aumento foi o T3 (52%). Protásio et al. (2012), ao avaliarem as correlações existentes entre as propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados, verificaram que quanto maior a densidade maior foi a taxa de não retorno em espessura, o que pôde ser verificado no presente trabalho.

O TUE sofreu efeito estatisticamente significativo apenas nos tratamentos T1, com uma redução de 5% e no tratamento T3, com um aumento de 6%. Esta redução no TUE evidenciou uma perda de higroscopicidade decorrente do tratamento de menor severidade.

De acordo com Del Menezzi (2004) quanto maior a temperatura utilizada no tratamento térmico menor é o inchamento definitivo do painel, indicando que o tratamento reduz o nível das tensões de compressão, proporcionando melhoria no inchamento dos painéis e aumento da estabilidade dimensional. Entretanto o presente trabalho indicou resultados contrários, representado pelo aumento da TNRE devido ao aumento da severidade do tratamento.

A Tabela 9 mostra os resultados da análise fatorial, ao nível de 5% de significância, onde é apresentado o efeito dos fatores temperatura e pressão sobre as propriedades físicas.

Tabela 9. Análise fatorial das propriedades físicas.

| Propriedade (%) | Fator | | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | Temperatura (°C) | | Pressão (%) | |
| | 150 | 170 | 25 | 50 |
| IE 2h | 9,80 ^{NS} | 9,59 ^{NS} | 8,17 ^{NS} | 11,50 ^{NS} |
| IE 24h | 35,08* | 48,00* | 35,45 ^{NS} | 47,56 ^{NS} |
| IE 72h | 46,56* | 62,64* | 49,05 ^{NS} | 59,72 ^{NS} |
| ABS 2h | 8,11 ^{NS} | 8,13 ^{NS} | 8,19 ^{NS} | 8,04 ^{NS} |
| ABS 24h | 46,30* | 60,47* | 51,87 ^{NS} | 53,93 ^{NS} |
| ABS 72h | 75,24* | 94,75* | 85,97 ^{NS} | 82,15 ^{NS} |
| TNRE | 49,67* | 63,37* | 49,11 ^{NS} | 64,04 ^{NS} |
| TUE | 8,88* | 9,67* | 9,27 ^{NS} | 9,20 ^{NS} |

IE 2h, 24h e 72h= inchamento em espessura após 2, 24 e 72 horas de imersão; ABS 2h, 24h e 72h= absorção após 2, 24 e 72 de imersão; TNRE= taxa de não retorno em espessura; TUE= teor de umidade de equilíbrio; *valores significativos ao nível de 5% de significância; ^{NS} não significativo de acordo com a análise fatorial.

O IE e a ABS foram afetadas significativamente apenas pela temperatura, em 24h e 72h de imersão. Isto pode indicar que a degradação das partículas pela ação do calor afeta negativamente o IE e a ABS. A TNRE e o TUE também foram afetados significativamente apenas pela temperatura.

Segundo Borges e Quirino (2004), a termorretificação diminui a higroscopicidade da madeira através da degradação da hemicelulose, que pode ser verificado ao se submeter amostras de madeira tratadas e não tratadas às mesmas condições de umidade. As amostras tratadas tendem a atingir um teor de umidade de equilíbrio menor, evidenciando a perda de

higroscopicidade e a maior estabilidade dimensional, visto que a amostra troca uma menor quantidade de água com o meio. Nesse sentido, foi possível observar comportamento contrário em painéis de madeira MDP, onde de acordo com o presente estudo, o tratamento termomecânico apresentou efeito negativo sobre a estabilidade dimensional do painel.

6. CONCLUSÃO

O tratamento termomecânico foi eficiente no aumento da densidade do painel e redução da sua espessura em todos os tratamentos, influenciado tanto pela temperatura como pela pressão. Entretanto, provocou um aumento da perda de massa, influenciado apenas pela temperatura.

Houve redução das propriedades mecânicas, exceto para a f_H , que apresentou aumento significativo em todos os tratamentos, sendo o T2 (150°C de temperatura e 50% da pressão) o melhor tratamento. No ensaio de ondas de tensão, o aumento da densidade decorrente do tratamento termomecânico contribuiu para o aumento do módulo de elasticidade dinâmico sendo o tratamento T4 (170°C de temperatura e 50% da pressão) o mais eficiente.

Os resultados obtidos para as propriedades físicas, de modo geral, indicaram uma redução significativa da estabilidade dimensional do material após o tratamento termomecânico, influenciado apenas pela temperatura (150°C e 170°C). Houve redução significativa do teor de umidade de equilíbrio apenas no tratamento T1 (150°C de temperatura e 25% da pressão), evidenciando uma redução da higroscopicidade ao se aplicar tratamentos menos severos.

O tratamento termomecânico não foi capaz de melhoras propriedades físicas e mecânicas de modo geral. Dessa forma, este tratamento é indicado para este material em usos onde a dureza superficial é essencial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, D.H.; SCALIANTE, R.M.; MACEDO, L.B.; MACÊDO, A.N.; DIAS, A.A.; CHRISTOFORO, A.L.; JUNIOR, C.C. Caracterização completa da madeira da espécie amazônica paricá (*Schizolobium amazonicum* HERB) em peças de dimensões estruturais. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 37, n. 6, p. 1175-1181, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. ASTM D143 – 94 (Reapproved 2000), 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. ASTM D1037-12, 2012
- ARAÚJO, H.J.B. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 37, n. 3, 2007.
- ARAÚJO, S.O.; VITAL, B.R.; MENDOZA, Z.M.S.H.; VIEIRA, T.A.; CARNEIRO, A.C.O. Propriedades de madeiras termorretificadas de *Eucalyptus grandis* SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n.95, p. 327-336, 2012.
- ARRUDA, L. M.; GONÇALEZ, J. C; DEL MENEZZI, C. H. S.; MELO, R. R. Estudo preliminar das propriedades de compensados produzidos com lâminas de paricá (*schizolobium amazonicum* huber ex ducke) modificadas termomecânicamente. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 02, n. 01, p. 29-42, 2011.
- 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.
- BOTREL, M.C.G.; SILVA, J.R.M.; TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S.; FERNANDES, B.F. Ganho genético em propriedades físicas e mecânicas de clones de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 76, p. 13-19, 2007.
- BRITO, J.O.; GARCIA, J.N.; JUNIOR, G.B.; PESSOA, A.M.C.; SILVA, P.H.M. Densidade básica e retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis*, submetida a diferentes temperaturas de termorretificação. **Cerne**, Lavras, v. 12, n.2, p. 182-188, 2006.
- BUSTOS,C.A.; ESCOBAR, W.G.; GLOUTIER, A.; FANG, C.H.; CARRASCO, P.V. Densification of woof veneers combined with oil-heat treatment. Part III: Cell wall mechanical propeties determined by nanoindentation. **BioResources**, v. 7, n. 2, p. 1525-1532, 2011.
- CLOUTIER, A.; FANG, C.; MARIOTTI, N.KOUBAA, A.; BLANCHET, P. Densification of wood veneers under the effect of heat, steam and pressure. **Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology**. November 10-12, 2008.

DEL MENEZZI, C. H. S. **Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)**. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR. 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, 2007.

FEIST, W.C.; SELL, J. Weathering behavior of dimensionally stabilized wood treated by heating under pressure of nitrogen gas. **Woodand Fiber Science**, v. 19, n. 2, p. 183-195, 1987.

FIGUEROA, M.J.M.; MORAES, P.D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

FREITAS, A. S.; GONÇALEZ, J. C.; DEL MENEZZI, C. H. Tratamento termomecânico e seus efeitos nas propriedades da *Simarouba amaram* (Aubl.). **Floresta e Ambiente**, 2015.

HEGER, F.; GROUX, M.; GIRARDET, F.; WELZBACHER, C.; RAPP, A.O.; NAVI, P. Mechanical and durability performance of THM-densified wood. **Finalworkshop COST Action E22 Environmental Optimisation of Wood Protection**, 2004.

HILLIG, E.; HASELEIN, C.R.; SANTINI, E.J. Propriedades mecânicas de chapas aglomeradas estruturais fabricadas com madeiras de pinus, eucalipto e acácia-negra. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 59-70, 2002.

IBÁ – indústria brasileira de árvores; 03 de setembro de 2015. Disponível em: <http://iba.org/pt/9-conteudo-pt/587-mdp-medium-density-particleboard-paineis-de-particulas-de-media-densidade>. Acessado em: 18/05/2016.

IWAKIRI, S.; ANDRADE, A.S.; JUNIOR, A.A.C.; CHIPANSKI, E.R.; PRATA, J.G.; ADRIAZOLA, M.K.O. Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-uréia-formaldeído. **Cerne**, v. 11, n. 4, p. 323-328, 2005.

IWAKIRI, S.; CAPRARA, A.C.; SAKS, D.C.O.; GUIANTES, F.P.; FRANZONI, J.A.; KRAMBECK, L.B.P.; RIGATTO, P.A. Produção de painéis de madeira aglomerada de alta densificação com diferentes tipos de resinas. **Scientia Forestalis**, n. 68, p.39-43, 2005.

IWAKIRI, S.; STINGHEN, A.B.M.; SILVEIRA, E.L.S.; ZAMARIAN, E.H.C.; PRATA, J.G.; BRONOSKI, M. Influência da massa específica sobre as propriedades mecânicas de painéis aglomerados. **Floresta**, v. 38, n. 3, 2008.

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

MENDES, R.F.; JÚNIOR, G.B.; GARLET, A.; ALMEIDA, N.F.; SURDI, P.G. Resistência ao ataque de fungos apodrecedores em painéis OSB termicamente tratados. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 551-557, 2013.

MENDES, R.F.; MENDES, L.M.; CARVALHO, A.G.; JÚNIOR, J.B.G.; MESQUITA, R.G.A. Determinação do módulo de elasticidade de painéis aglomerados por stress wave timer. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n 2, p. 117-122, 2012.

MENDES, L.M; SILVA, G.A; TRUGILHO, P.F; SALDANHA, F.K; MORI, F.A; PÁDUA, F.A. Influência do teor de resina, temperatura e tempo de prensagem na umidade de equilíbrio de painéis de partículas de madeira. **Cerne**, Lavras, v. 12, n.4, p.329-335, 2006.

MELO, R.R.; DEL MENEZZI, C.H.S. Influência da Massa específica nas propriedades físico-mecânicas de painéis. **Silva Lusitana**, v. 18, n. 1, p. 59-73, 2010.

MELO, R.R. Estabilidade dimensional de compostos de madeira. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 4, n. 2, p. 152-175, 2013.

MOURA, L.F.; BRITO, J.O.; JUNIOR, G.B. Efeitos da termorreificação 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.

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

PIERRE, F.C.; BALLARIN, A.W.; PALMA, H.L. Caracterização física de painéis aglomerados de *Eucalyptus grandis* com adição de resíduos industriais madeireiros. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 321-328, 2014.

PINTO, E.M.; JUNIOR, C.C.; Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de *Eucalyptus* de uso estrutural exposta ao fogo. **Minerva**, v. 3, n. 2, p. 131-140, 2003.

PROTÁSIO, T.P.; JÚNIOR, J.B.G.; MENDES, R.F.; MENDES, L.M.; GUIMARÃES, B.M.R. Correlações entre as propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 2, p. 123-132, 2012.

SILVA, D.A.L.; VARANDA, L.D.; ROCCO LAHR, F.A. Análise Energética do Ciclo de Vida Produtivo do Painel de Madeira MDP no Brasil. **4 th International Workshop | Advances in Cleaner Production – Academic Work**. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013.

SILVA, G.A; MENDES, L.M; TRUGILHO, P.F; MORI, F.A; SANTOS, I.F; PÁDUA, F.A. Efeito de algumas variáveis de processamento nas propriedades físicas de painéis de madeira de partículas alongadas. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 1, 2006.

SILVA, L.C.; LIMA, F.O.; CAMPOS, C.I.; OLIVEIRA, D.R. Análise das propriedades físicas de painéis MDP com quatro diferentes tempos de prensagem. **XV EBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**. 09-11/março, Curitiba, PR, Brasil, 2015.

STANGERLIN, D.M.; CADEMARTORI, P.H.G.; GATTO, D.A.; CALEGARI, L.; MELO, R.R.; VIVIAN, M.A.; MODES, K.S. Propagação indireta e semidireta de ondas ultrassônicas na estimativa de propriedades mecânicas da madeira. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 02, n. 02, p. 85-95, 2011.

ULKER, O.; IMIRZI, O.; BURDURLU, E. The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of scots pine (*Pinus Sylvestris* L.). **BioResources**, v. 7, n. 4, p. 5581-5592, 2012.

UNSAI, O; KORKUT, S; ATIK, C. The effect of heat treatment on some properties and colour in eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* DEHN.) wood. **Maderas**, Cienc. tecnol., v. 5, n. 2, p. 145-152, 2003.

VITAL, B.R.; ANDRADE, P.I.L.; CARNEIRO, A.C.O.; CABRAL, C.P.T.; CARVALHO, A.M.M. Estabilidade dimensional e resistência a tração perpendicular de painéis fabricados com partículas termorretificadas oriundas de embalagens de Pinus sp. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, n. 5, p. 951-959, 2014.

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

Descriptive Statistics

| Temperatura | | | Mean | Std. Deviation | N |
|-------------|-------|-------|----------|----------------|----|
| TxD | 150 | 25 | 6,91330 | 1,175578 | 4 |
| | | 50 | 22,56502 | 1,385062 | 4 |
| | | Total | 14,73916 | 8,450310 | 8 |
| | 170 | 25 | 8,27066 | 1,438169 | 4 |
| | | 50 | 25,52325 | 2,137993 | 4 |
| | | Total | 16,89696 | 9,374905 | 8 |
| | Total | 25 | 7,59198 | 1,416021 | 8 |
| | | 50 | 24,04414 | 2,298151 | 8 |
| | | Total | 15,81806 | 8,693677 | 16 |
| TxC | 150 | 25 | 13,05511 | ,758229 | 4 |
| | | 50 | 24,80373 | ,827391 | 4 |
| | | Total | 18,92942 | 6,322730 | 8 |
| | 170 | 25 | 16,10157 | 1,206862 | 4 |
| | | 50 | 27,19745 | ,997078 | 4 |
| | | Total | 21,64951 | 6,018889 | 8 |
| | Total | 25 | 14,57834 | 1,876779 | 8 |
| | | 50 | 26,00059 | 1,535114 | 8 |
| | | Total | 20,28946 | 6,126571 | 16 |
| PM | 150 | 25 | 7,59285 | ,349117 | 4 |
| | | 50 | 8,51778 | ,550339 | 4 |
| | | Total | 8,05531 | ,653043 | 8 |
| | 170 | 25 | 10,09229 | ,525026 | 4 |
| | | 50 | 9,45972 | ,490490 | 4 |
| | | Total | 9,77601 | ,579283 | 8 |
| | Total | 25 | 8,84257 | 1,398317 | 8 |
| | | 50 | 8,98875 | ,697433 | 8 |
| | | Total | 8,91566 | 1,070121 | 16 |

TXD

| Tratamento | N | Subset for alpha = 0.05 | | |
|------------|---|-------------------------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 4 | 6,91330 | 22,56502 | 25,52325 |
| 3 | 4 | 8,27066 | | |
| 2 | 4 | | | |
| 4 | 4 | | | |

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 |
| 1 | 4 | 13,05511 | 16,10157 | 24,80373 | 27,19745 |
| 3 | 4 | | | | |
| 2 | 4 | | | | |
| 4 | 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 |
| 1 | 4 | 7,59285 | 8,51778 | 9,45972 |
| 2 | 4 | | | |
| 4 | 4 | | | |
| 3 | 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 | TxD | 1103,881 ^a | 3 | 367,960 | 148,077 | ,000 |
| | TxC | 551,893 ^b | 3 | 183,964 | 198,335 | ,000 |
| | PM | 14,354 ^c | 3 | 4,785 | 20,340 | ,000 |
| Intercept | TxD | 4003,375 | 1 | 4003,375 | 1611,060 | ,000 |
| | TxC | 6586,597 | 1 | 6586,597 | 7101,131 | ,000 |
| | PM | 1271,824 | 1 | 1271,824 | 5406,331 | ,000 |
| temperatura | TxD | 18,624 | 1 | 18,624 | 7,495 | ,018 |
| | TxC | 29,596 | 1 | 29,596 | 31,908 | ,000 |
| | PM | 11,843 | 1 | 11,843 | 50,344 | ,000 |
| pressão | TxD | 1082,694 | 1 | 1082,694 | 435,704 | ,000 |
| | TxC | 521,871 | 1 | 521,871 | 562,639 | ,000 |
| | PM | ,085 | 1 | ,085 | ,363 | ,558 |
| temperatura * | TxD | 2,563 | 1 | 2,563 | 1,031 | ,330 |
| | TxC | ,426 | 1 | ,426 | ,459 | ,511 |
| | PM | 2,426 | 1 | 2,426 | 10,312 | ,007 |
| Error | TxD | 29,819 | 12 | 2,485 | | |
| | TxC | 11,131 | 12 | ,928 | | |
| | PM | 2,823 | 12 | ,235 | | |
| Total | TxD | 5137,076 | 16 | | | |
| | TxC | 7149,620 | 16 | | | |
| | PM | 1289,001 | 16 | | | |
| Corrected Total | TxD | 1133,700 | 15 | | | |
| | TxC | 563,023 | 15 | | | |
| | PM | 17,177 | 15 | | | |

a. R Squared = ,974 (Adjusted R Squared = ,967)

b. R Squared = ,980 (Adjusted R Squared = ,975)

c. R Squared = ,836 (Adjusted R Squared = ,795)

APÊNDICE 2 – PROPRIEDADES MECÂNICAS

Descriptives

| | N | Mean | Std. Deviation | Std. Error | 95% Confidence Interval for Mean | | Minimum | Maximum | |
|-------------------|--------------|------|----------------|------------|----------------------------------|-------------|-----------|---------|---------|
| | | | | | Lower Bound | Upper Bound | | | |
| | | | | | | | | | |
| f _m | 150-25 | 16 | 11,09 | 1,24 | ,31096 | 10,4233 | 11,7489 | 9,39 | 13,87 |
| | 150-50 | 14 | 11,27 | 0,96 | ,25690 | 10,7129 | 11,8229 | 10,28 | 13,46 |
| | 170-25 | 16 | 8,28 | 0,82 | ,20514 | 7,8398 | 8,7143 | 6,76 | 9,49 |
| | 170-50 | 16 | 10,00 | 1,94 | ,48458 | 8,9632 | 11,0289 | 8,06 | 14,41 |
| | "Testemunha" | 16 | 13,78 | 1,35 | ,33681 | 13,0631 | 14,4989 | 11,79 | 15,98 |
| | Total | 78 | 10,87 | 2,24 | ,25392 | 10,3661 | 11,3773 | 6,76 | 15,98 |
| E _M | 150-25 | 16 | 2270,88 | 390,81 | 97,70357 | 2062,6264 | 2479,1268 | 1893,57 | 2905,33 |
| | 150-50 | 13 | 1921,00 | 118,79 | 32,94712 | 1849,2141 | 1992,7853 | 1780,88 | 2258,79 |
| | 170-25 | 16 | 1803,80 | 157,17 | 39,29190 | 1720,0475 | 1887,5449 | 1503,26 | 2048,83 |
| | 170-50 | 16 | 2228,72 | 661,42 | 165,35486 | 1876,2737 | 2581,1648 | 1672,41 | 3412,09 |
| | "Testemunha" | 16 | 2468,15 | 378,95 | 94,73834 | 2266,2210 | 2670,0810 | 2089,06 | 3131,53 |
| | Total | 77 | 2146,98 | 460,24 | 52,44910 | 2042,5215 | 2251,4444 | 1503,26 | 3412,09 |
| f _H | 150-25 | 15 | 4148,91 | 188,02 | 48,54734 | 4044,7883 | 4253,0357 | 3866,73 | 4557,83 |
| | 150-50 | 15 | 5829,53 | 378,83 | 97,81287 | 5619,7383 | 6039,3137 | 4889,56 | 6362,09 |
| | 170-25 | 16 | 4234,42 | 317,89 | 79,47296 | 4065,0293 | 4403,8145 | 3604,20 | 4659,33 |
| | 170-50 | 16 | 5528,36 | 446,09 | 111,52353 | 5290,6513 | 5766,0649 | 4704,98 | 6239,39 |
| | "Testemunha" | 16 | 3447,77 | 272,61 | 68,15301 | 3302,5097 | 3593,0391 | 3072,17 | 3904,59 |
| | Total | 78 | 4628,79 | 959,93 | 108,69091 | 4412,3564 | 4845,2189 | 3072,17 | 6362,09 |
| f _{c,0°} | 150-25 | 16 | 8,34 | 1,09 | ,27339 | 7,7528 | 8,9183 | 6,36 | 10,29 |
| | 150-50 | 16 | 8,95 | 1,17 | ,29302 | 8,3250 | 9,5741 | 6,39 | 10,83 |
| | 170-25 | 16 | 5,36 | 1,12 | ,27884 | 4,7607 | 5,9494 | 3,50 | 6,84 |
| | 170-50 | 16 | 8,18 | 1,39 | ,34634 | 7,4468 | 8,9232 | 5,88 | 10,58 |
| | "Testemunha" | 16 | 8,97 | 1,20 | ,30075 | 8,3308 | 9,6128 | 6,92 | 10,76 |
| | Total | 80 | 7,96 | 1,78 | ,19944 | 7,5624 | 8,3564 | 3,50 | 10,83 |

Multiple Comparisons

| Dependent Variable | | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. | 95% Confidence Interval | | |
|--------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------|-----------|-------------------------|-------------|-----------|
| | | | | | Lower Bound | Upper Bound | |
| f _m | Dunnett t (2-sided) ^a | 150-25 "Testemunha" | -2,69493* | ,46981 | ,000 | -3,8687 | -1,5212 |
| | | 150-50 "Testemunha" | -2,51311* | ,48630 | ,000 | -3,7281 | -1,2982 |
| | | 170-25 "Testemunha" | -5,50397* | ,46981 | ,000 | -6,6777 | -4,3302 |
| | | 170-50 "Testemunha" | -3,78501* | ,46981 | ,000 | -4,9588 | -2,6112 |
| E _M | Dunnett t (2-sided) ^a | 150-25 "Testemunha" | -197,27440 | 141,58774 | ,444 | -551,2818 | 156,7330 |
| | | 150-50 "Testemunha" | -547,15126* | 149,53332 | ,002 | -921,0247 | -173,2778 |
| | | 170-25 "Testemunha" | -664,35474* | 141,58774 | ,000 | -1018,3621 | -310,3474 |
| | | 170-50 "Testemunha" | -239,43173 | 141,58774 | ,276 | -593,4391 | 114,5756 |
| f _H | Dunnett t (2-sided) ^a | 150-25 "Testemunha" | 701,13763* | 119,86241 | ,000 | 401,6840 | 1000,5913 |
| | | 150-50 "Testemunha" | 2381,75163* | 119,86241 | ,000 | 2082,2980 | 2681,2053 |
| | | 170-25 "Testemunha" | 786,64750* | 117,91329 | ,000 | 492,0634 | 1081,2316 |
| | | 170-50 "Testemunha" | 2080,58375* | 117,91329 | ,000 | 1785,9996 | 2375,1679 |
| f _{c,0°} | Dunnett t (2-sided) ^a | 150-25 "Testemunha" | -,63627 | ,42368 | ,374 | -1,6933 | ,4207 |
| | | 150-50 "Testemunha" | -,02224 | ,42368 | 1,000 | -1,0792 | 1,0348 |
| | | 170-25 "Testemunha" | -3,61676* | ,42368 | ,000 | -4,6738 | -2,5597 |
| | | 170-50 "Testemunha" | -,78684 | ,42368 | ,201 | -1,8439 | ,2702 |

*. 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 | 72,324 ^a | 3 | 24,108 | 14,778 | ,000 |
| | MOE | 2464776,356 ^b | 3 | 821592,119 | 4,795 | ,005 |
| | Dureza | 30644029,075 ^c | 3 | 10214676,358 | 86,584 | ,000 |
| | Compressão | 104,793 ^d | 3 | 34,931 | 24,989 | ,000 |
| Intercept | MOR | 5726,746 | 1 | 5726,746 | 3510,557 | ,000 |
| | MOE | 238519250,442 | 1 | 238519250,442 | 1391,969 | ,000 |
| | Dureza | 1374577674,548 | 1 | 1374577674,548 | 11651,480 | ,000 |
| | Compressão | 3283,845 | 1 | 3283,845 | 2349,205 | ,000 |
| Temperatura | MOR | 47,956 | 1 | 47,956 | 29,397 | ,000 |
| | MOE | 74101,938 | 1 | 74101,938 | ,432 | ,514 |
| | Dureza | 118348,797 | 1 | 118348,797 | 1,003 | ,321 |
| | Compressão | 40,477 | 1 | 40,477 | 28,956 | ,000 |
| Pressão | MOR | 10,203 | 1 | 10,203 | 6,254 | ,015 |
| | MOE | 10228,639 | 1 | 10228,639 | ,060 | ,808 |
| | Dureza | 30625352,739 | 1 | 30625352,739 | 259,593 | ,000 |
| | Compressão | 30,245 | 1 | 30,245 | 21,637 | ,000 |
| Temperatura * Pressão | MOR | 10,714 | 1 | 10,714 | 6,568 | ,013 |
| | MOE | 2242760,000 | 1 | 2242760,000 | 13,088 | ,001 |
| | Dureza | 443208,629 | 1 | 443208,629 | 3,757 | ,058 |
| | Compressão | 26,499 | 1 | 26,499 | 18,957 | ,000 |
| Error | MOR | 88,090 | 54 | 1,631 | | |
| | MOE | 9253110,360 | 54 | 171353,896 | | |
| | Dureza | 6370623,915 | 54 | 117974,517 | | |
| | Compressão | 75,484 | 54 | 1,398 | | |
| Total | MOR | 5916,833 | 58 | | | |
| | MOE | 258202909,196 | 58 | | | |
| | Dureza | 1410086097,290 | 58 | | | |
| | Compressão | 3464,403 | 58 | | | |
| Corrected Total | MOR | 160,414 | 57 | | | |
| | MOE | 11717886,716 | 57 | | | |
| | Dureza | 37014652,991 | 57 | | | |
| | Compressão | 180,277 | 57 | | | |

a. R Squared = ,451 (Adjusted R Squared = ,420)

b. R Squared = ,210 (Adjusted R Squared = ,166)

Paired Samples Statistics^a

| | | Mean | N | Std. Deviation | Std. Error Mean |
|--------|--------|---------|---|----------------|-----------------|
| Pair 1 | v0 | 2125,25 | 4 | 145,788 | 72,894 |
| | vf | 2083,36 | 4 | 141,8506607 | 70,9253304 |
| Pair 2 | Ed0 | 2945,75 | 4 | 382,122 | 191,061 |
| | Edf | 3068,33 | 4 | 418,6647458 | 209,3323729 |
| Pair 3 | desnd0 | 650,42 | 4 | 4,8007916 | 2,4003958 |
| | densf | 704,46 | 4 | 6,7068855 | 3,3534428 |

a. Tratamento = 1

Paired Samples Statistics^a

| | | Mean | N | Std. Deviation | Std. Error Mean |
|--------|--------|---------|---|----------------|-----------------|
| Pair 1 | v0 | 2179,25 | 4 | 106,256 | 53,128 |
| | vf | 2161,59 | 4 | 112,5692957 | 56,2846478 |
| Pair 2 | Ed0 | 3082,25 | 4 | 285,074 | 142,537 |
| | Edf | 3632,07 | 4 | 358,7647461 | 179,3823730 |
| Pair 3 | desnd0 | 647,98 | 4 | 3,5221504 | 1,7610752 |
| | densf | 775,93 | 4 | 2,4917115 | 1,2458557 |

a. Tratamento = 2

Paired Samples Statistics^a

| | | Mean | N | Std. Deviation | Std. Error Mean |
|--------|--------|---------|---|----------------|-----------------|
| Pair 1 | v0 | 2264,25 | 4 | 19,568 | 9,784 |
| | vf | 2228,00 | 4 | 28,6477050 | 14,3238525 |
| Pair 2 | Ed0 | 3322,50 | 4 | 92,529 | 46,265 |
| | Edf | 3474,17 | 4 | 96,3887824 | 48,1943912 |
| Pair 3 | desnd0 | 647,95 | 4 | 7,2363148 | 3,6181574 |
| | densf | 699,77 | 4 | 5,0762251 | 2,5381126 |

a. Tratamento = 3

Paired Samples Statistics^a

| | | Mean | N | Std. Deviation | Std. Error Mean |
|--------|--------|---------|---|----------------|-----------------|
| Pair 1 | v0 | 2196,00 | 4 | 101,137 | 50,568 |
| | vf | 2196,37 | 4 | 104,7370054 | 52,3685027 |
| Pair 2 | Ed0 | 3134,00 | 4 | 256,784 | 128,392 |
| | Edf | 3791,53 | 4 | 325,0804712 | 162,5402356 |
| Pair 3 | desnd0 | 649,20 | 4 | 10,7458472 | 5,3729236 |
| | densf | 785,09 | 4 | 8,6974723 | 4,3487361 |

a. Tratamento = 4

APÊNDICE 3 – PROPRIEDADES FÍSICAS

Descriptives

| | N | Mean | Std. Deviation | Std. Error | 95% Confidence Interval for Mean | | Minimum | Maximum | |
|-----|--------------|------|----------------|------------|----------------------------------|-------------|---------|---------|-------|
| | | | | | Lower Bound | Upper Bound | | | |
| | | | | | | | | | |
| I2 | 150-25 | 14 | 8,22 | 0,47 | ,12575 | 7,9519 | 8,4953 | 7,42 | 9,10 |
| | 150-50 | 16 | 11,13 | 1,29 | ,32274 | 10,4379 | 11,8137 | 9,24 | 13,36 |
| | 170-25 | 16 | 8,22 | 0,87 | ,21838 | 7,7574 | 8,6883 | 6,67 | 9,87 |
| | 170-50 | 15 | 11,85 | 1,14 | ,29447 | 11,2167 | 12,4798 | 9,54 | 14,12 |
| | "Testemunha" | 16 | 5,79 | 0,47 | ,11852 | 5,5342 | 6,0395 | 5,02 | 6,78 |
| | Total | 77 | 9,03 | 2,40 | ,27362 | 8,4813 | 9,5712 | 5,02 | 14,12 |
| I24 | 150-25 | 15 | 27,79 | 2,40 | ,61978 | 26,4641 | 29,1227 | 24,05 | 30,64 |
| | 150-50 | 16 | 41,72 | 3,73 | ,93146 | 39,7304 | 43,7011 | 33,32 | 45,57 |
| | 170-25 | 16 | 42,17 | 8,41 | 2,10189 | 37,6913 | 46,6515 | 26,90 | 54,51 |
| | 170-50 | 15 | 55,71 | 3,58 | ,92491 | 53,7311 | 57,6986 | 48,18 | 60,17 |
| | "Testemunha" | 16 | 22,26 | 1,05 | ,26138 | 21,7050 | 22,8193 | 20,28 | 24,10 |
| | Total | 78 | 37,83 | 12,63 | 1,42962 | 34,9867 | 40,6802 | 20,28 | 60,17 |
| I72 | 150-25 | 16 | 38,78 | 3,27 | ,81739 | 37,0384 | 40,5228 | 30,35 | 42,64 |
| | 150-50 | 16 | 52,99 | 3,40 | ,84993 | 51,1832 | 54,8064 | 45,16 | 56,35 |
| | 170-25 | 16 | 57,80 | 10,31 | 2,57819 | 52,3057 | 63,2962 | 39,97 | 73,35 |
| | 170-50 | 15 | 69,10 | 5,05 | 1,30401 | 66,2985 | 71,8922 | 59,82 | 79,92 |
| | "Testemunha" | 16 | 33,22 | 1,17 | ,29257 | 32,5936 | 33,8408 | 31,77 | 35,39 |
| | Total | 79 | 50,14 | 14,06 | 1,58152 | 46,9923 | 53,2894 | 30,35 | 79,92 |
| A2 | 150-25 | 16 | 8,36 | 0,68 | ,17123 | 7,9936 | 8,7235 | 6,95 | 9,45 |
| | 150-50 | 16 | 7,94 | 0,60 | ,15075 | 7,6138 | 8,2564 | 6,68 | 8,63 |
| | 170-25 | 16 | 8,20 | 0,82 | ,20429 | 7,7619 | 8,6328 | 6,46 | 9,89 |
| | 170-50 | 12 | 8,28 | 0,36 | ,10469 | 8,0457 | 8,5066 | 7,49 | 8,78 |
| | "Testemunha" | 16 | 10,20 | 0,72 | ,18016 | 9,8150 | 10,5830 | 8,95 | 11,34 |
| | Total | 76 | 8,61 | 1,06 | ,12176 | 8,3674 | 8,8525 | 6,46 | 11,34 |
| A24 | 150-25 | 15 | 43,03 | 1,49 | ,38574 | 42,1985 | 43,8531 | 40,09 | 45,21 |
| | 150-50 | 16 | 49,09 | 3,35 | ,83643 | 47,3070 | 50,8726 | 42,71 | 54,71 |
| | 170-25 | 16 | 59,49 | 6,30 | 1,57609 | 56,1263 | 62,8450 | 46,41 | 67,86 |
| | 170-50 | 16 | 60,59 | 4,14 | 1,03413 | 58,3898 | 62,7982 | 53,63 | 67,92 |
| | "Testemunha" | 16 | 46,79 | 2,32 | ,57985 | 45,5511 | 48,0229 | 43,83 | 50,68 |
| | Total | 79 | 51,91 | 8,00 | ,89977 | 50,1162 | 53,6988 | 40,09 | 67,92 |
| A72 | 150-25 | 16 | 75,11 | 3,42 | ,85557 | 73,2909 | 76,9381 | 69,65 | 81,27 |

Descriptives

| | N | Mean | Std. Deviation | Std. Error | 95% Confidence Interval for Mean | | Minimum | Maximum |
|--------------|----|-------|----------------|------------|----------------------------------|-------------|---------|---------|
| | | | | | Lower Bound | Upper Bound | | |
| | | | | | | | | |
| 150-50 | 16 | 75,85 | 3,46 | ,86380 | 74,0109 | 77,6931 | 70,04 | 81,18 |
| 170-25 | 15 | 96,38 | 5,97 | 1,54054 | 93,0731 | 99,6814 | 84,31 | 110,09 |
| 170-50 | 16 | 90,90 | 6,17 | 1,54272 | 87,6089 | 94,1853 | 79,34 | 101,40 |
| "Testemunha" | 16 | 76,77 | 3,10 | ,77486 | 75,1158 | 78,4190 | 71,62 | 84,01 |
| Total | 79 | 82,83 | 9,92 | 1,11656 | 80,6094 | 85,0552 | 69,65 | 110,09 |
| TNRE | | | | | | | | |
| 150-25 | 16 | 40,21 | 9,93 | 2,48186 | 34,9176 | 45,4976 | 24,42 | 59,36 |
| 150-50 | 16 | 57,29 | 12,98 | 3,24567 | 50,3752 | 64,2112 | 38,44 | 75,57 |
| 170-25 | 16 | 56,03 | 9,76 | 2,44109 | 50,8292 | 61,2353 | 35,84 | 70,08 |
| 170-50 | 16 | 72,39 | 9,48 | 2,37006 | 67,3410 | 77,4443 | 49,36 | 83,43 |
| "Testemunha" | 16 | 36,91 | 9,18 | 2,29617 | 32,0154 | 41,8038 | 21,50 | 50,88 |
| Total | 80 | 52,57 | 16,40 | 1,83389 | 48,9168 | 56,2173 | 21,50 | 83,43 |
| TUE | | | | | | | | |
| 150-25 | 16 | 8,73 | 0,19 | ,04768 | 8,6328 | 8,8361 | 8,38 | 9,05 |
| 150-50 | 14 | 9,01 | 0,24 | ,06329 | 8,8779 | 9,1513 | 8,51 | 9,50 |
| 170-25 | 15 | 9,73 | 0,82 | ,21192 | 9,2716 | 10,1807 | 8,66 | 11,70 |
| 170-50 | 16 | 9,50 | 0,38 | ,09434 | 9,2971 | 9,6993 | 8,80 | 9,98 |
| "Testemunha" | 16 | 9,15 | 0,21 | ,05149 | 9,0448 | 9,2642 | 8,82 | 9,48 |
| Total | 77 | 9,22 | 0,55 | ,06268 | 9,0997 | 9,3494 | 8,38 | 11,70 |

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" | 2,43675* | ,33658 | ,000 | 1,5953 | 3,2782 |
| | | 150-50 "Testemunha" | 5,33892* | ,32517 | ,000 | 4,5260 | 6,1519 |
| | | 170-25 "Testemunha" | 2,43600* | ,32517 | ,000 | 1,6230 | 3,2490 |
| | | 170-50 "Testemunha" | 6,06137* | ,33054 | ,000 | 5,2350 | 6,8878 |
| I24 | Dunnett t (2-sided) ^a | 150-25 "Testemunha" | 5,53122* | 1,65353 | ,005 | 1,4002 | 9,6623 |
| | | 150-50 "Testemunha" | 19,45355* | 1,62664 | ,000 | 15,3897 | 23,5174 |
| | | 170-25 "Testemunha" | 19,90924* | 1,62664 | ,000 | 15,8454 | 23,9731 |

Multiple Comparisons

| Dependent Variable | | | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. | 95% Confidence Interval | | |
|--------------------|-------------------------------------|--------|-----------------------|------------|---------|-------------------------|-------------|---------|
| | | | | | | Lower Bound | Upper Bound | |
| I72 | Dunnett t (2-sided) ^a | 170-50 | "Testemunha" | 33,45265* | 1,65353 | ,000 | 29,3216 | 37,5837 |
| | | 150-25 | "Testemunha" | 5,56339* | 1,97392 | ,022 | ,6353 | 10,4914 |
| | | 150-50 | "Testemunha" | 19,77764* | 1,97392 | ,000 | 14,8496 | 24,7057 |
| | | 170-25 | "Testemunha" | 24,58378* | 1,97392 | ,000 | 19,6557 | 29,5118 |
| | | 170-50 | "Testemunha" | 35,87817* | 2,00655 | ,000 | 30,8687 | 40,8877 |
| A2 | Dunnett t (2-sided) ^a | 150-25 | "Testemunha" | -1,84045* | ,23640 | 0,000 | -2,4320 | -1,2489 |
| | | 150-50 | "Testemunha" | -2,26385* | ,23640 | 0,000 | -2,8554 | -1,6723 |
| | | 170-25 | "Testemunha" | -2,00159* | ,23640 | 0,000 | -2,5931 | -1,4101 |
| | | 170-50 | "Testemunha" | -1,92285* | ,25535 | 0,000 | -2,5618 | -1,2839 |
| | | 150-25 | "Testemunha" | -3,76124* | 1,40609 | ,032 | -7,2716 | -,2508 |
| A24 | Dunnett t (2-sided) ^a | 150-50 | "Testemunha" | 2,30276 | 1,38323 | ,287 | -1,1506 | 5,7561 |
| | | 170-25 | "Testemunha" | 12,69859* | 1,38323 | ,000 | 9,2453 | 16,1519 |
| | | 170-50 | "Testemunha" | 13,80699* | 1,38323 | ,000 | 10,3537 | 17,2603 |
| | | 150-25 | "Testemunha" | -1,65289 | 1,62769 | ,702 | -5,7165 | 2,4108 |
| | | 150-50 | "Testemunha" | -,91543 | 1,62769 | ,947 | -4,9791 | 3,1482 |
| A72 | Dunnett t (2-sided) ^a | 170-25 | "Testemunha" | 19,60981* | 1,65460 | ,000 | 15,4790 | 23,7406 |
| | | 170-50 | "Testemunha" | 14,12967* | 1,62769 | ,000 | 10,0660 | 18,1933 |
| | | 150-25 | "Testemunha" | 3,29799 | 3,66292 | ,779 | -5,8404 | 12,4364 |
| | | 150-50 | "Testemunha" | 20,38358* | 3,66292 | ,000 | 11,2452 | 29,5220 |
| | | 170-25 | "Testemunha" | 19,12261* | 3,66292 | ,000 | 9,9842 | 28,2610 |
| TNRE | Dunnett t (2-sided) ^a | 170-50 | "Testemunha" | 35,48305* | 3,66292 | ,000 | 26,3446 | 44,6215 |
| | | 150-25 | "Testemunha" | -,42006* | ,15297 | ,027 | -,8025 | -,0376 |
| | | 150-50 | "Testemunha" | -,13989 | ,15834 | ,793 | -,5358 | ,2560 |
| | | 170-25 | "Testemunha" | ,57167* | ,15550 | ,002 | ,1829 | ,9604 |
| | | 170-50 | "Testemunha" | ,34369 | ,15297 | ,091 | -,0388 | ,7261 |

Multiple Comparisons

| Dependent Variable | Mean Difference (I-J) | Std. Error | Sig. | 95% Confidence Interval | |
|--------------------|-----------------------------|------------|------|----------------------------|----------------|
| | | | | Lower Bound | Upper Bound |

*. 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 | I2 | 138,441 ^a | 3 | 46,147 | 46,006 | ,000 |
| | I4 | 529,436 ^b | 3 | 176,479 | 70,355 | ,000 |
| | I8 | 2071,439 ^c | 3 | 690,480 | 71,676 | ,000 |
| | I16 | 3522,538 ^d | 3 | 1174,179 | 60,204 | ,000 |
| | I24 | 4460,740 ^e | 3 | 1486,913 | 64,618 | ,000 |
| | I48 | 4745,525 ^f | 3 | 1581,842 | 63,583 | ,000 |
| | I72 | 5259,686 ^g | 3 | 1753,229 | 52,846 | ,000 |
| | A2 | 1,732 ^h | 3 | ,577 | 1,398 | ,255 |
| | A4 | 55,564 ⁱ | 3 | 18,521 | 10,316 | ,000 |
| | A8 | 719,450 ^j | 3 | 239,817 | 30,308 | ,000 |
| | A16 | 1693,894 ^k | 3 | 564,631 | 38,992 | ,000 |
| | A24 | 2733,363 ^l | 3 | 911,121 | 62,643 | ,000 |
| | A48 | 3699,662 ^m | 3 | 1233,221 | 75,855 | ,000 |
| | A72 | 4803,169 ⁿ | 3 | 1601,056 | 64,164 | ,000 |
| | TNRE | 5898,562 ^o | 3 | 1966,187 | 17,970 | ,000 |
| | TUE | 8,799 ^p | 3 | 2,933 | 11,852 | ,000 |
| Intercept | I2 | 4698,959 | 1 | 4698,959 | 4684,566 | ,000 |
| | I4 | 12763,783 | 1 | 12763,783 | 5088,438 | ,000 |
| | I8 | 33631,678 | 1 | 33631,678 | 3491,182 | ,000 |
| | I16 | 64583,182 | 1 | 64583,182 | 3311,383 | ,000 |
| | I24 | 85980,331 | 1 | 85980,331 | 3736,507 | ,000 |
| | I48 | 126012,778 | 1 | 126012,778 | 5065,168 | ,000 |
| | I72 | 146928,309 | 1 | 146928,309 | 4428,702 | ,000 |
| | A2 | 3203,054 | 1 | 3203,054 | 7757,012 | ,000 |

Tests of Between-Subjects Effects

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. | |
|-------------|-------------------------|------------|-------------|------------|-----------|------|
| Temperatura | A4 | 10342,692 | 1 | 10342,692 | 5760,866 | ,000 |
| | A8 | 33702,550 | 1 | 33702,550 | 4259,370 | ,000 |
| | A16 | 82419,349 | 1 | 82419,349 | 5691,725 | ,000 |
| | A24 | 137980,427 | 1 | 137980,427 | 9486,614 | ,000 |
| | A48 | 270122,433 | 1 | 270122,433 | 16615,111 | ,000 |
| | A72 | 347626,843 | 1 | 347626,843 | 13931,578 | ,000 |
| | TNRE | 157857,161 | 1 | 157857,161 | 1442,767 | ,000 |
| | TUE | 4140,557 | 1 | 4140,557 | 16730,247 | ,000 |
| | I2 | ,695 | 1 | ,695 | ,693 | ,410 |
| | I4 | 66,052 | 1 | 66,052 | 26,333 | ,000 |
| | I8 | 764,364 | 1 | 764,364 | 79,346 | ,000 |
| | I16 | 1814,211 | 1 | 1814,211 | 93,020 | ,000 |
| | I24 | 2611,983 | 1 | 2611,983 | 113,511 | ,000 |
| | I48 | 3248,338 | 1 | 3248,338 | 130,569 | ,000 |
| | I72 | 3755,407 | 1 | 3755,407 | 113,195 | ,000 |
| | A2 | ,019 | 1 | ,019 | ,045 | ,832 |
| | A4 | 36,022 | 1 | 36,022 | 20,064 | ,000 |
| | A8 | 573,767 | 1 | 573,767 | 72,513 | ,000 |
| | A16 | 1461,578 | 1 | 1461,578 | 100,934 | ,000 |
| | A24 | 2525,892 | 1 | 2525,892 | 173,663 | ,000 |
| | A48 | 3436,637 | 1 | 3436,637 | 211,386 | ,000 |
| | A72 | 4420,062 | 1 | 4420,062 | 177,139 | ,000 |
| | TNRE | 2953,082 | 1 | 2953,082 | 26,990 | ,000 |
| | TUE | 7,103 | 1 | 7,103 | 28,699 | ,000 |
| Pressão | I2 | 137,671 | 1 | 137,671 | 137,249 | ,000 |
| | I4 | 503,059 | 1 | 503,059 | 200,550 | ,000 |
| | I8 | 1565,542 | 1 | 1565,542 | 162,513 | ,000 |
| | I16 | 2147,584 | 1 | 2147,584 | 110,113 | ,000 |
| | I24 | 2363,184 | 1 | 2363,184 | 102,699 | ,000 |
| | I48 | 1922,321 | 1 | 1922,321 | 77,269 | ,000 |
| | I72 | 1989,226 | 1 | 1989,226 | 59,959 | ,000 |

Tests of Between-Subjects Effects

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. | |
|-----------------------|-------------------------|----------|-------------|--------|-------|------|
| A2 | ,152 | 1 | ,152 | ,369 | ,547 | |
| A4 | 23,137 | 1 | 23,137 | 12,887 | ,001 | |
| A8 | 229,019 | 1 | 229,019 | 28,944 | ,000 | |
| A16 | 294,555 | 1 | 294,555 | 20,341 | ,000 | |
| A24 | 166,722 | 1 | 166,722 | 11,463 | ,001 | |
| A48 | ,581 | 1 | ,581 | ,036 | ,851 | |
| A72 | 30,068 | 1 | 30,068 | 1,205 | ,278 | |
| TNRE | 3378,016 | 1 | 3378,016 | 30,874 | ,000 | |
| TUE | 3,655E-05 | 1 | 3,655E-05 | ,000 | ,990 | |
| I2 | ,542 | 1 | ,542 | ,540 | ,466 | |
| I4 | 5,274 | 1 | 5,274 | 2,103 | ,154 | |
| I8 | 54,545 | 1 | 54,545 | 5,662 | ,022 | |
| I16 | 5,056 | 1 | 5,056 | ,259 | ,613 | |
| I24 | ,006 | 1 | ,006 | ,000 | ,988 | |
| I48 | 14,611 | 1 | 14,611 | ,587 | ,447 | |
| I72 | 9,947 | 1 | 9,947 | ,300 | ,587 | |
| Temperatura * Pressão | A2 | 1,457 | 1 | 1,457 | 3,529 | ,067 |
| | A4 | 7,763 | 1 | 7,763 | 4,324 | ,043 |
| | A8 | 25,492 | 1 | 25,492 | 3,222 | ,079 |
| | A16 | 17,658 | 1 | 17,658 | 1,219 | ,275 |
| | A24 | 51,539 | 1 | 51,539 | 3,543 | ,066 |
| | A48 | 79,956 | 1 | 79,956 | 4,918 | ,032 |
| | A72 | 52,680 | 1 | 52,680 | 2,111 | ,153 |
| | TNRE | 58,707 | 1 | 58,707 | ,537 | ,468 |
| | TUE | ,994 | 1 | ,994 | 4,016 | ,051 |
| | Error | I2 | 46,141 | 46 | 1,003 | |
| I4 | | 115,386 | 46 | 2,508 | | |
| I8 | | 443,133 | 46 | 9,633 | | |
| I16 | | 897,156 | 46 | 19,503 | | |
| I24 | | 1058,501 | 46 | 23,011 | | |

Tests of Between-Subjects Effects

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|-----------------|-------------------------|------------|-------------|---------|------|
| Total | I48 | 1144,402 | 46 | 24,878 | |
| | I72 | 1526,113 | 46 | 33,176 | |
| | A2 | 18,994 | 46 | ,413 | |
| | A4 | 82,585 | 46 | 1,795 | |
| | A8 | 363,978 | 46 | 7,913 | |
| | A16 | 666,106 | 46 | 14,481 | |
| | A24 | 669,058 | 46 | 14,545 | |
| | A48 | 747,851 | 46 | 16,258 | |
| | A72 | 1147,812 | 46 | 24,952 | |
| | TNRE | 5032,988 | 46 | 109,413 | |
| | TUE | 11,385 | 46 | ,247 | |
| | I2 | 4889,664 | 50 | | |
| | I4 | 13215,146 | 50 | | |
| | I8 | 34956,019 | 50 | | |
| | I16 | 67376,272 | 50 | | |
| | I24 | 89648,749 | 50 | | |
| | I48 | 130665,919 | 50 | | |
| | I72 | 152367,840 | 50 | | |
| | A2 | 3318,230 | 50 | | |
| | A4 | 10582,108 | 50 | | |
| A8 | 34530,259 | 50 | | | |
| A16 | 85268,828 | 50 | | | |
| A24 | 142876,838 | 50 | | | |
| A48 | 279824,628 | 50 | | | |
| A72 | 360537,722 | 50 | | | |
| TNRE | 167591,792 | 50 | | | |
| TUE | 4289,159 | 50 | | | |
| Corrected Total | I2 | 184,582 | 49 | | |
| | I4 | 644,822 | 49 | | |
| | I8 | 2514,572 | 49 | | |
| | I16 | 4419,694 | 49 | | |
| | | | | | |

Tests of Between-Subjects Effects

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|--------|-------------------------|----|-------------|---|------|
| I24 | 5519,241 | 49 | | | |
| I48 | 5889,927 | 49 | | | |
| I72 | 6785,799 | 49 | | | |
| A2 | 20,726 | 49 | | | |
| A4 | 138,150 | 49 | | | |
| A8 | 1083,428 | 49 | | | |
| A16 | 2360,000 | 49 | | | |
| A24 | 3402,422 | 49 | | | |
| A48 | 4447,514 | 49 | | | |
| A72 | 5950,981 | 49 | | | |
| TNRE | 10931,550 | 49 | | | |
| TUE | 20,184 | 49 | | | |

- a. R Squared = ,750 (Adjusted R Squared = ,734)
- b. R Squared = ,821 (Adjusted R Squared = ,809)
- c. R Squared = ,824 (Adjusted R Squared = ,812)
- d. R Squared = ,797 (Adjusted R Squared = ,784)
- e. R Squared = ,808 (Adjusted R Squared = ,796)
- f. R Squared = ,806 (Adjusted R Squared = ,793)
- g. R Squared = ,775 (Adjusted R Squared = ,760)
- h. R Squared = ,084 (Adjusted R Squared = ,024)
- i. R Squared = ,402 (Adjusted R Squared = ,363)
- j. R Squared = ,664 (Adjusted R Squared = ,642)
- k. R Squared = ,718 (Adjusted R Squared = ,699)
- l. R Squared = ,803 (Adjusted R Squared = ,791)
- m. R Squared = ,832 (Adjusted R Squared = ,821)
- n. R Squared = ,807 (Adjusted R Squared = ,795)
- o. R Squared = ,540 (Adjusted R Squared = ,510)
- p. R Squared = ,436 (Adjusted R Squared = ,399)